

# Kwantificering kritische (grond-)stoffen in E-waste producten



Verkenning kritische grondstoffen in  
Groot Witgoed, Verlichting,  
Printplaten, CRT TV's, Mobiele telefoons  
en Batterijen

12 augustus 2011

In opdracht van	Vereniging NVMP
Auteur	Dr.ir. Antoinette van Schaik MARAS – Material Recycling and Sustainability - Den Haag, Nederland
Report no.	MARAS_NVMP_12082011
Datum	12 augustus 2011

# Inhoudsopgave

Executive summary/Samenvatting .....	I
1. Introductie .....	1
1.1 E-waste recycling en de Grondstoffenrotonde .....	1
1.2 Kritische grondstoffen.....	2
1.3 Productie/aanbod, vraag en toepassing kritische stoffen .....	4
2. Kwantificering kritische stoffen in E-waste (voor een geselecteerd aantal producten/componenten) .....	7
2.1 Kritische stoffen in Wasmachines en ander Groot Witgoed .....	7
2.2 Kritische materialen (REOs) in Verlichting .....	11
2.3 Kritische stoffen in Printplaten (Printed Wire Boards – PWBs) .....	13
2.4 Kritische stoffen in CRT TV's .....	17
2.5 Kritische stoffen in Mobiele telefoons.....	18
2.6 Kritische stoffen in Batterijen (accu's) .....	19
Discussie.....	24
Referenties.....	25
Appendix A.....	27
Appendix B .....	30
Appendix C .....	31
Appendix D.....	35
Appendix E .....	38
Appendix F .....	39
Appendix G.....	40

Deze pagina is met opzet blanco gelaten

## Executive summary/Samenvatting

De recycling van E-waste/WEEE speelt een rol in de terugwinning van grondstoffen en 'kritische materialen' zoals onder andere wordt beoogd met het concept van de Grondstoffenrotonde. E-waste is rijk aan een veelheid van grondstoffen, waaronder verscheidene 'kritische stoffen', aangemerkt door de EU<sup>1</sup>.

Om een beeld te krijgen van de aanwezigheid van de verschillende kritische stoffen, de hoeveelheden hiervan in verschillende typen E-waste stromen/producten en de hoeveelheden van deze stoffen zoals ingezameld en verwerkt in Nederland door Wecycle/NVMP, zijn in dit onderzoek deze kritische stoffen gekwantificeerd voor een geselecteerd aantal E-waste producten. Dit rapport beschrijft de resultaten van dit onderzoek. Tevens is een overzicht gegeven van beschikbare productiegegevens en toepassing van deze stoffen in elektronische producten.

De kwantificering is uitgevoerd op basis van beschikbare analyses en literatuurgegevens voor de samenstelling van E-waste producten. Waar deze gegevens deels ontbreken of slechts in beperkte mate beschikbaar zijn, beoogt dit onderzoek niet uitputtend te zijn voor alle aanwezige kritische stoffen. Dit onderzoek is uitgevoerd door MARAS (Material Recycling and Sustainability, Nederland) in opdracht van de Vereniging NVMP.

### Kritische stoffen in E-waste

Tabel I - 1 toont de als kritisch aangemerkte grondstoffen door de EU. Dit rapport geeft een korte achtergrond over het vaststellen en identificeren van 'kritische' grondstoffen.

**Tabel I - 1: Kritische grondstoffen binnen de EU<sup>1</sup>**

**List of critical raw materials at EU level (in alphabetical order):**

Antimony	Indium
Beryllium	Magnesium
Cobalt	Niobium
Fluorspar	PGMs (Platinum Group Metals) <sup>1</sup>
Gallium	Rare earths <sup>2</sup>
Germanium	Tantalum
Graphite	Tungsten

<sup>1</sup> The Platinum Group Metals (PGMs) regroup platinum, palladium, iridium, rhodium, ruthenium and osmium.

<sup>2</sup> Rare earths include yttrium, scandium, and the so-called lanthanides (lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, promethium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium and lutetium)

De voornaamste toepassingen van de kritische materialen in E-waste zijn (overzicht is niet uitputtend, maar geeft de belangrijkste toepassingen en/of toepassingen op basis van databeschikbaarheid uit literatuur en/of analyses):

- PGMs (Platinum Group Metals) (en PMs – Precious Metals) en RareEarths/Rare Earth Oxides (Res/REOs) (Zeldzame Aarden) in (hoogwaardige) printplaten;
- Indium (In) in LCD schermen;
- Gallium (Ga), Indium (In) en REs in LED verlichting;

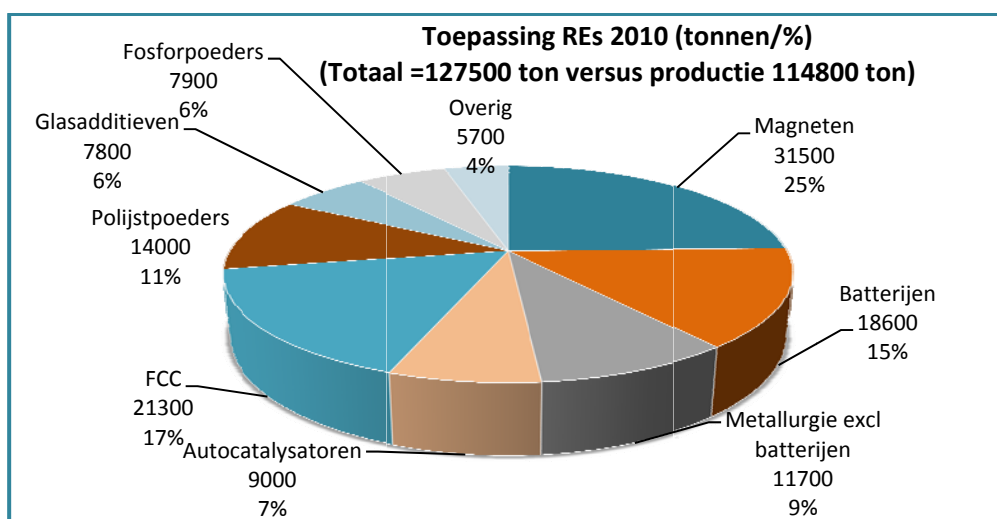
<sup>1</sup> Critical raw materials for the EU (2010): Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, Enterprise and Industry Directorate General, 85p. ([http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index_en.htm))

- Wolfram (W) in getters in CRT TV's en verlichting;
- REs in fluorescerende poeders in verlichting en CRT TV's en batterijen;
- PGMs in hard-disks;
- Antimoon als vlamvertrager en in CRT glas;
- Kobalt in batterijen.

## Productie/aanbod, vraag en toepassing kritische stoffen

Om een kader te scheppen voor de kwantitatieve bijdrage van E-waste in de markt/recycling van kritische grondstoffen zijn de productieggetallen voor een aantal materialen meegenomen. Voor Verlichting is tevens de bijdrage van Nederland in de hoeveelheid poeders/REs aanwezig in de ingezamelde lampen in 2010 vergeleken met vrijkomende hoeveelheden in Europa.

De wereldproductie, vraag en toepassing van REs/REOs is weergegeven in Figuur I - 1. Tabel I - 2 geeft voor het merendeel van de overige kritische grondstoffen de wereldproductie, vraag voor toepassing in EEE (Electric and Electronic Equipment) en geschatte reserves weer.



Figuur I - 1: Vraag en toepassing REs in 2010

Tabel I - 2: Wereldproductie, toepassing in EEE (Electronic and Electronic Equipment) en wereldreserves voor een aantal (kritische) materialen

Metaal	Primaire wereldproductie	Bijproduct van	Vraag voor EEE	Vraag/productie	Wereldreserve
	t/y		t/y	%	(*1000t)
Ag	20000	Pb, Zn	6000	30	400
Au	25000	Cu	300	12	47
Pd	230	PGM	33	14	-
Pt	210	PGM	13	6	
Ru	32	PGM	27	84	
Cu	15000000		4500000	30	540000
Sn	275000		90000	33	5600
Sb	130000		65000	50	2100
Co	58000	Ni, Cu	11000	19	6600
Bi	56000	Pb, W, Zn	900	16	320
Se	1400	Cu	240	17	
In	480	Zn, Pb	380	79	

## Kwantificering kritische stoffen in E-waste (voor een geselecteerd aantal producten/componenten)

Op basis van gegevens afkomstig uit diverse literatuurbronnen voor:

- gewicht van de producten;
- materiaalsamenstelling van de producten;
- aanwezigheid (%) van kritische stoffen in product;
- en aanwezigheid (%) van componenten/materialen waarin deze zich bevinden (printplaten, fosforpoeders, etc.);

is een berekening gemaakt van de gemiddelde (bandbreedte) van de gewichten en aanwezigheid van de kritische stoffen. Vanwege de variatie in bovenstaande gegevens, is de hoeveelheid kritische stoffen binnen de bandbreedte van deze variatie weergegeven. De inventarisatie en berekeningen zijn uitgevoerd voor de volgende producten: Wasmachines en Groot Witgoed; Verlichting; Printplaten (Printed Wire Boards:PWBs) voor Videorecorders, DVD spelers, Hifi units en Radiosets; CRT TV's; mobiele telefoons en batterijen. Tabel I - 3 geeft een overzicht van de gemiddelde hoeveelheden per apparaat, Tabel I - 4 toont de totaalhoeveelheden ingezameld door NVMP/Wecycle in 2010 (Au en Ag zijn formeel niet aangemerkt als kritische stof, maar zijn wel in deze studie meegenomen).

**Tabel I - 3: Gemiddelde hoeveelheden kritische grondstoffen in diverse E-waste producten (op basis van diverse literatuurbronnen) (gram/ton apparaat) <sup>1</sup>**

Hoeveelheden [gram/ton apparaat]	PMs		PGMs		Rare Earths (Oxides)			Overig					
	Ag	Au	Pd	Pt	Y	Eu	Overige	Sb	Co	In	Ga	W	Ta
Wasmachine	0.59 - 0.64	0.14 - 0.15	0.07 - 0.08										
GWG	0.00 - 0.54	0.00 - 0.13	0.00 - 0.07										
Videorecorder	67 - 94	3.1 - 4.3	1.0 - 1.4				*	*					*
DVD speler	70 - 113	10 - 16	2.1 - 3.4				*	*					*
Hi-fi unit	54 - 71	2.5 - 3.3	0.8 - 1.1				*	*					*
Radioset	104 - 107	13.6 - 13.9	1.6 - 1.7				*	*					*
CRT TV	8.4 - 155	0.51 - 11	0.3 - 4.0		16 - 19 <sup>a</sup>	1.3 - 2.0 <sup>a</sup>	*	216 <sup>b</sup>	8 <sup>b</sup>			*	*
Mobiele telefoon	786 - 2440	81 - 800	63 - 610	1.5 - 36		*			19,289 - 45,509	*			*
Fluorescerende lampen						1,514 - 16,245						*	*
LED						*				*	*	*	
LCD schermen	*	*	*			*				*			
Batterijen (NiMH)						~80,000			~30,000				

\*mogelijk aanwezig, geen/niet voldoende (openbare) kwantitatieve data beschikbaar.  
<sup>a</sup> zeer beperkte data voor % fluorescerende poeders in CRT TVs beschikbaar  
<sup>b</sup> op basis van slechts 1 literatuurbron  
<sup>c</sup> 0.06-5.6 gram In/m<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Inventarisatie beoogt niet uitputtend te zijn voor alle aanwezige kritische stoffen vanwege deels ontbreken of slechts in beperkte mate beschikbaar zijn van gegevens.

**Tabel I - 4: Apparaten inzameling en gemiddelde ingezamelde hoeveelheden kritische grondstoffen in diverse E-waste producten in 2010 (op basis van diverse literatuurbronnen) (kg/jaar)**

Hoeveelheden [kg] ingezameld	PMs		PGMs		Rare Earths (Oxides)			Overig					
	Ag	Au	Pd	Pt	Y	Eu	Overige REs	Sb	Co	In	Ga	W	Ta
Apparaten inzameling in tonnage in 2010													
Wasmachine	19,089	11 - 12	2.7 - 2.9	1.3 - 1.5									
GWG	31,339	0.0 - 17	0.0 - 4.1	0.0 - 2.2									
Videorecorder	945	64 - 89	2.9 - 4.1	0.9 - 1.3			*	*					*
DVD-speler	636	45 - 72	6.4 - 10	1.3 - 2.2			*	*					*
Hi-fi unit	1,467	79 - 104	3.7 - 4.8	1.2 - 1.6			*	*					*
Radioset	1,192	124 - 128	16 - 17	1.9 - 2.0			*	*					*
CRT TV	20,349	171 - 3154	10 - 224	6.1 - 81		326 - 387	26 - 41	*	4395	163		*	*
Mobiele telefoon	10,000	7860 - 24400	810 - 8100	630 - 6100	15 - 360		*			192,890 - 455,090	*		*
Fluorescerende lampen	1663					2518 - 27015						*	*
LED	0					*				*	*	*	
LCD-schermen	232	*	*	*						*			
Batterijen (NiMH)	3					250				94			

\*mogelijk aanwezig, geen/niet voldoende (openbare) kwantitatieve data beschikbaar.  
<sup>a</sup> 0.06-5.6 gram In/m<sup>2</sup>

(GWG is inclusief wasmachines)

## Terugwinning en/of verliezen van kritische stoffen en voorspelling vrijkomende hoeveelheden kritische stoffen in E-waste en recyclingpercentages over tijd

Voor elk van de producten is de mogelijkheid tot terugwinning en/of verliezen van de kritische stoffen in fysische en metallurgische recycling getoond (zie Tabel I - 5). De terugwinbaarheid van de materialen is afhankelijk van de gevolgde verwerkingsroute (demontage, shredderen en sortering en de gekozen eindverwerkingstechnologie) en kan verschillen als gevolg hiervan. In producten zijn materialen bij elkaar gebracht die van nature (technisch gezien) niet of niet in bepaalde combinaties geheel zijn terug te winnen in de (metallurgische) eindverwerkingsprocessen. Dit wordt gedictieerd door de chemie (en thermodynamica). De terugwinbaarheid van materialen kan verschillen per product ten gevolge van de gecombineerde materialen, wijze van toepassing (op welk component, met welke andere materialen gecombineerd, etc), verwerkingsroute en eindverwerking. De legenda in Tabel I – 5 geeft hier een toelichting op. Het rapport bespreekt dit in meer detail.

Tabel I - 6 geeft de relatieve noodzaak tot terugwinning weer op basis van de door de EU aangemerkte lijst van kritische grondstoffen.

Tabel I - 5 : Terugwinbaarheid kritische materialen voor diverse E-waste producten inclusief toelichting

Terugwinbaarheid * (per apparaat/toepassing)	PMs		PGMs		Rare Earths (Oxides)			Overig					©MARAS
	Ag	Au	Pd	Pt	Y	Eu	Overige REs	Sb	Co	In	Ga	W	Ta
Wasmachine	Yellow	Yellow	Yellow										
GWG	Yellow	Yellow	Yellow										
Videorecorder	Yellow	Yellow	Yellow				Yellow	Red					Yellow
DVD speler	Yellow	Yellow	Yellow				Yellow	Red					Yellow
Hifi unit	Yellow	Yellow	Yellow				Yellow	Red					Yellow
Radioset	Yellow	Yellow	Yellow				Yellow	Red					Yellow
CRT TV	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Yellow		Yellow	Yellow
Mobiele telefoon	Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Fluorescerende lampen					Yellow	Yellow	Yellow					Yellow	Yellow
LED					Yellow	Yellow	Yellow			Yellow	Green	Yellow	Yellow
LCD schermen	Yellow	Yellow	Yellow		Yellow	Yellow	Yellow			Yellow	Green	Yellow	Yellow
Batterijen (NiMH)					Green	Green	Green		Green				

\*De terugwinbaarheid is afhankelijk van de gevolgde verwerkingsroute. De tabel toont de terugwinbaarheid voor de huidige meest waarschijnlijke en/of gebruikte verwerkingsroutes.

Terugwinning mogelijk	Indien separaat afgescheiden en/of indien direct verwerkt in juiste eindverwerkingstechnologie.
Bepaalde terugwinning/terugwinning onder voorwaarden	Indien separaat afgescheiden. Gedeeltelijke verliezen tijdens scheiding en/of eindverwerking. Terugwinning mits verwerkt in passende eindverwerkingstechnologie (infrastructuur ontbreekt grotendeels in EU voor REs).
Geen separate terugwinning	Zuivere scheiding niet mogelijk. Gaat verloren naar recyclaten bulkmaterialen tijdens scheiding en/of tijdens hoogtemperatuur eindverwerking (verontreiniging in metaal of naar slak/vliegias).
Bij een combinatie van kleuren geldt:	De daadwerkelijke terugwinbaarheid/recyclebaarheid van de materialen is afhankelijk van de gevolgde verwerkingsroute en kan verschillen als gevolg hiervan. Terugwinning is alleen (gedeeltelijk) mogelijk als de W/Ta/REs (sterk oxidisch, eindigen in slak) houdende componenten worden gedemonteerd en separaat verwerkt in passende eindverwerking.

Tabel I - 6 : Relatieve noodzaak terugwinning van kritische grondstoffen

Relatieve noodzaak terugwinning	PMs		PGMs		Rare Earths (Oxides)			Overig					©MARAS
	Ag	Au	Pd	Pt	Y	Eu	Overige REs	Sb	Co	In	Ga	W	Ta
	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
Aangemerkt als kritisch : Concentratie van productie en mijnbouw in beperkt aantal landen, hoge afhankelijkheid en/of slecht substitueerbaar en/of recycling en recovery uit producten beperkt.	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
Niet aangemerkt als kritisch, (momenteel) wel waardevol	Yellow	Yellow	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
Niet aangemerkt als kritisch, (momenteel) niet waardevol	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green



Op basis van de recyclingmodellen zoals ontwikkeld door MARAS in opdracht van NVMP/Wecycle zijn als voorbeeld berekeningen voor de terugwinning van printplaten tijdens fysische verwerking en de terugwinning van de kritische stoffen hieruit in metallurgische verwerking getoond. Dit is eveneens mogelijk voor alle andere producten.

In dit document is tevens met een kort voorbeeld aangetoond hoe voorspellingen kunnen worden gedaan voor de terugwinning (recyclingprestatie) van de afzonderlijke kritische stoffen uit de verschillende E-waste producten op basis van de, door MARAS voor NVMP/Wecycle ontwikkelde, recyclingmodellen. De recycling/recovery van (kritische) stoffen uit E-waste kan als functie van tijd worden voorspeld door het combineren van levensduur-, en tijdsafhankelijke gewichts- en samenstellingdistributies van de producten en kritische stoffen hierin.

## Conclusie

Om een volledig gekwantificeerd beeld te krijgen van het voorkomen van alle als ‘kritisch’ aangemerkte stoffen in E-waste zal het onderzoek zoals nu is uitgevoerd voor een aantal producten, eveneens voor de andere E-waste producten dienen te worden uitgevoerd. De terugwinbaarheid van de materialen uit diverse producten kan verschillen per product en is afhankelijk van de gekozen verwerkingsroute, eindverwerkingstechnologie en combinatie van materialen in een product.

Voor het vaststellen van de kwantitatieve rol van de recycling van E-waste in de terugwinning van grondstoffen en kritische materialen (zoals onder andere wordt beoogd met het concept van de Grondstoffenrotonde en als één van de pijlers in het bereiken van Resource Efficiency binnen Europa) is het noodzakelijk dat meer en goede productgegevens (incl. consistente analyses van aanwezige kritische grondstoffen/elementen) beschikbaar zijn en/of worden uitgevoerd. Voor de huidige beschikbare data geldt dat deze vaak op een verschillende basis, voor een niet altijd consistente lijst aan materialen/stoffen/chemische componenten beschikbaar/verkregen is. Verschillende analyses en literatuurbronnen zijn hierdoor niet altijd (goed) met elkaar te combineren en/of te vergelijken.

Het voorbeeld van het aandeel kritische stoffen uit het E-waste (REOs uit Verlichting) vrijgekomen in Nederland versus Europa (en/of wereldproductie) kan ook voor de andere producten en kritische materialen worden uitgewerkt, om zo een kwantitatief beeld van de bijdrage/rol van E-waste recycling in Nederland aan de totale Europese en/of wereldmarkt van vrijgekomen/geproduceerde kritische stoffen te verkrijgen.

In een eerder document is aangegeven wat de voorwaarden en uitdagingen zijn voor het slagen van de Grondstoffenrotonde en een Resource Efficient Europe.



# 1. Introductie

## 1.1 E-waste recycling en de Grondstoffenrotonde

De recycling van E-waste/WEEE speelt een rol in de terugwinning van grondstoffen en kritische materialen zoals onder andere wordt beoogd met het concept van de Grondstoffenrotonde. Tevens wordt recycling genoemd als een van de pijlers in het bereiken van Resource Efficiency binnen Europa [1]. E-waste is rijk aan een groot aantal verschillende grondstoffen, te onderscheiden in:

- Grondstoffen ('Commodity materials') zoals staal, koper, aluminium, kunststof, etc.
- Kritische grondstoffen, zoals geïdentificeerd door de EU [2] (zie Tabel 1) in het kader van het 'EU Raw Materials Initiative'[3], welke vaak in kleine hoeveelheden in deze producten aanwezig zijn (scarce/minor elements).

Tabel 1: Kritische grondstoffen binnen de EU [2]

List of critical raw materials at EU level (in alphabetical order):

Antimony	Indium
Beryllium	Magnesium
Cobalt	Niobium
Fluorspar	PGMs (Platinum Group Metals) <sup>1</sup>
Gallium	Rare earths <sup>2</sup>
Germanium	Tantalum
Graphite	Tungsten

<sup>1</sup> The Platinum Group Metals (PGMs) regroups platinum, palladium, iridium, rhodium, ruthenium and osmium.

<sup>2</sup> Rare earths include yttrium, scandium, and the so-called lanthanides (lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, promethium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium and lutetium)

Tabel 2 geeft een overzicht van het voorkomen van deze kritische materialen in diverse opkomende technologieën. De voornaamste toepassingen van de kritische materialen in E-waste zijn (dit overzicht is niet uitputtend, maar geeft de belangrijkste toepassingen en/of toepassingen op basis van databeschikbaarheid uit literatuur en/of analyses):

- PGMs (Platinum Group Metals) (en PMs – Precious Metals) en RareEarths/REs (Zeldzame Aarden) in (hoogwaardige) printplaten;
- Indium (In) in LCD schermen;
- Gallium (Ga), Indium (In) en REs in LED verlichting;
- Wolfram (W) in getters in CRT TV's en verlichting;
- REs in fluorescerende poeders in verlichting en CRT TV's en batterijen;
- PGMs in hard-disks;
- Antimoon (Sb) als vlamvertrager en in CRT glas;
- Kobalt (Co) in batterijen.

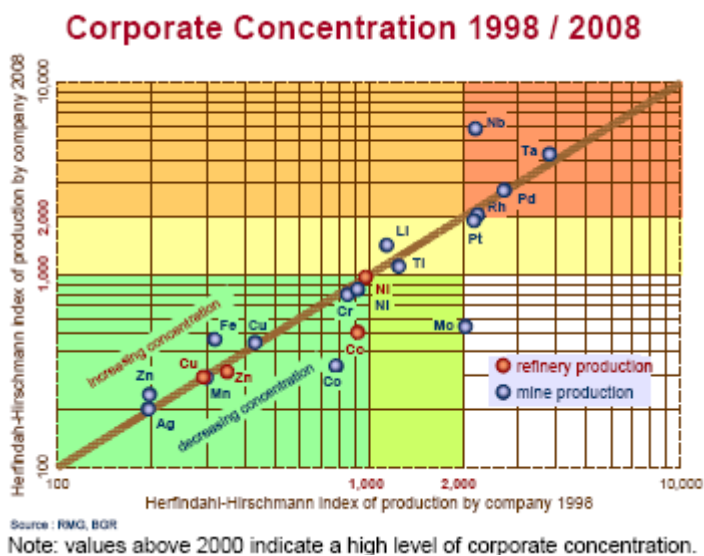
Tabel 2: Grondstoffen in belangrijke opkomende technologieën/toepassingen [2]

Raw material	Emerging technologies (selected)
Gallium	Thin layer photovoltaics, IC, WLED
Neodymium	Permanent magnets, laser technology
Indium	Displays, thin layer photovoltaics
Germanium	Fibre optic cable, IR optical technologies
Platinum	Fuel cells, catalysts
Tantalum	Micro capacitors, medical technology
Silver	RFID, lead-free soft solder
Cobalt	Lithium-ion batteries, synthetic fuels
Palladium	Catalysts, seawater desalination
Titanium	Seawater desalination, implants
Copper	Efficient electric motors, RFID
Niobium	Micro capacitors, ferroalloys
Antimony	ATO, micro capacitors
Chromium	Seawater desalination, marine technologies

## 1.2 Kritische grondstoffen

### 1.2.1 Kritische factoren in productie, beschikbaarheid (supply-risk) en economisch belang

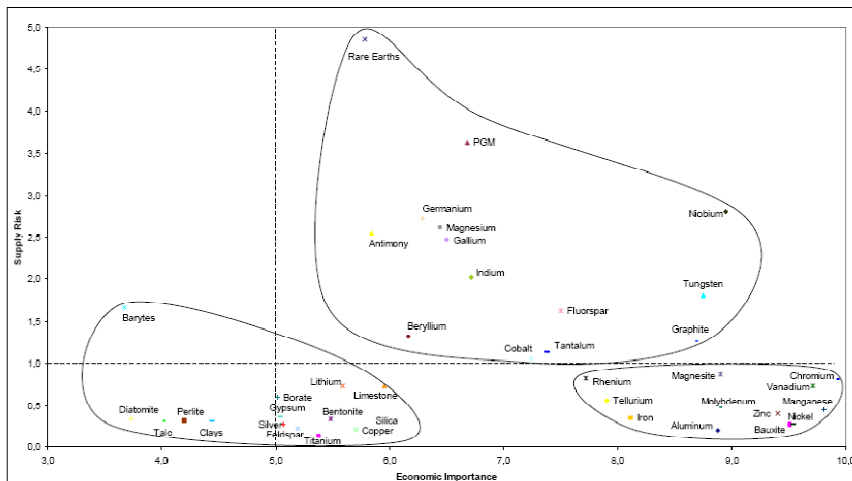
De EU heeft de in Tabel 1 genoemde grondstoffen voornamelijk aangemerkt als kritisch vanwege kritische factoren in productie en afhankelijkheid van slechts een klein aantal producerende landen [2] (zie Figuur 1).



Figuur 1 : Productieconcentratie voor geselecteerde metaalertsen en producten in 1998 en 2008 [4]

De ontwikkelingen op geopolitiek en economisch gebied beïnvloeden in sterke mate de groeiende vraag naar grondstoffen, gedreven door ontwikkelende economieën en technologieën. Dit wordt tevens onderbouwd door ontwikkelingsstrategieën van deze opkomende economieën (door handel- en belastingsmaatregelen, investeringen en het reserveren van de grondstoffenbasis/-productie/-reserves voor eigen gebruik). In een aantal gevallen wordt deze situatie versterkt door de concentratie van productie in slechts een beperkt aantal landen. De 'kritiekheid' als gevolg van deze afhankelijkheid in productie en de hoge 'supply-risk' van de aangemerkte lijst grondstoffen wordt

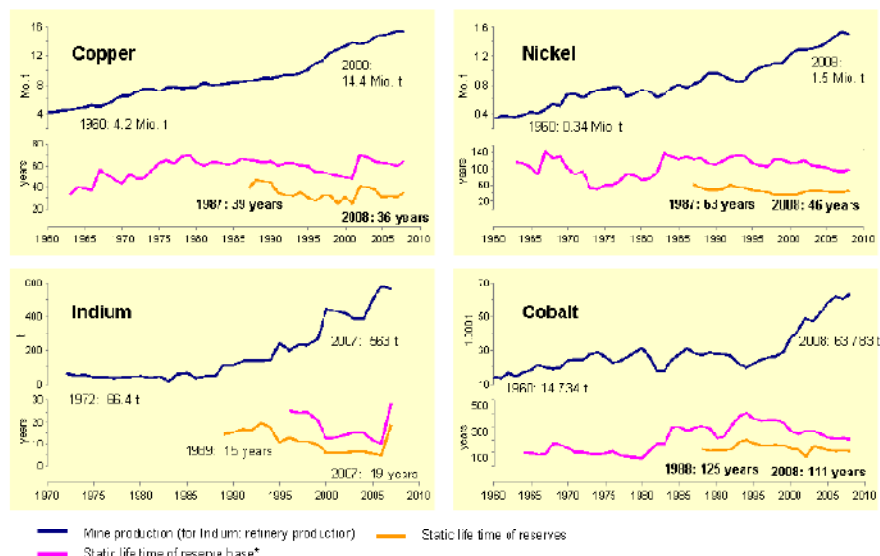
bovendien veelal versterkt door slechte substitutiemogelijkheden van deze grondstoffen samen met (wereldwijd) lage recyclingpercentages [2]. Figuur 2 geeft een overzicht van deze analyse voor deze grondstoffen, de materialen in de rechterbovenhoek zijn aangemerkt als kritisch (hoge 'supply risk' en economisch belang). Veel van deze kritische grondstoffen zijn essentieel voor de productie van 'high-tech' toepassingen, die een cruciale rol spelen in een duurzame samenleving, zoals het gebruik van zeldzame aarden (REs) in elektrische auto's, windenergie, elektronica, optische toepassingen, defensie, etc.



Figuur 2: Economisch belang en 'supply risk' van 41 materialen (geclusterd) [2]

### 1.2.2 Geologisch voorkomen en schaarste

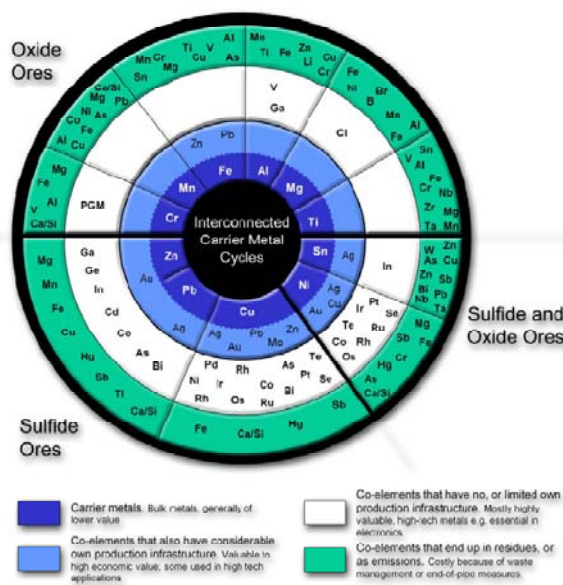
Geologische schaarste is niet meegenomen in het vaststellen van de kritische stoffen. De onzekerheid in schattingen van wereldwijde grondstoffenreserves is erg groot en daarmee een onbetrouwbare indicator voor lange termijn beschikbaarheid. Over de afgelopen 50 jaar is het ingeschatte aantal jaren van de beschikbaarheid en reserves van grondstoffen steeds aangepast (naar de toekomst) (zie Figuur 3).



Figuur 3 : Berekende statische levensduur van mineraalreserves en de reserves voor koper, nikkel, kobalt en indium (y=years, t=tonnes). Bron : [4] en Bron: UGSG voor Data voor reserves [2]

### 1.2.3 Bijproducten

Een aantal metalen komt alleen voor als bijproduct of gekoppeld product in ertsen van zogenoemde ‘carrier metals’, waarin deze metalen in lage concentratie voorkomen (zie Figuur 4). De economische drijfveer voor mijnbouw en productie is hier specifiek het ‘carrier metal’. Typische bijproducten zijn germanium (in zinkerts), gallium (in bauxiet), selenium, tellurium (lood -en kopererts) and indium (in zinkerts). REs kunnen voorkomen in ijzererts. Rhenium wordt geproduceerd als bijproduct van molybdeen, een bijproduct van koper. Sommige ‘minor’ metalen komen voor als gekoppelde elementen, die gezamenlijk worden gemijnd en verwerkt. Voorbeelden hiervan zijn platinum groep metalen (PGMs), REs, en tantalum-niobium (sommige bijproductmetalen kunnen vanwege verhoogde concentratie in het erts om economische redenen als ‘target’ metaal worden gewonnen). Toegankelijkheid en ‘supply’ van bij- en gekoppelde producten kunnen onder druk komen te staan als de gemijnde volumes (vanwege het ‘carrier metal’) niet de marktvrage hiervoor kunnen bevredigen.



Figuur 4: Metal Wheel [2] en [5] (toestemming van M.A. Reuter) – gekoppeld voorkomen en verwerking van ‘carrier metals’ en bijproducten (co-elementen)

Voor REs geldt dat, in tegenstelling tot wat de naam doet vermoeden, deze zeldzame aarden niet schaars zijn en relatief veel voorkomen in de aardkorst. Ze zijn echter slechts zelden geconcentreerd in mijnbare ertsafzettingen. De ertsen van de zeldzame aarden zijn bovendien mineralogisch en chemisch complex en in het algemeen radioactief. De reserves van REs/REOs zijn geschat op 99 miljoen ton (zie Tabel A - 1 Appendix A) [6] en [7].

### 1.3 Productie/aanbod, vraag en toepassing kritische stoffen

Om een kader te scheppen voor de kwantificering van kritische stoffen in E-waste, geeft deze paragraaf een beknopt overzicht van wereldproductiegegevens en vraag naar kritische stoffen in E-waste vanuit de literatuur (zonder hierbij als doel te hebben volledig te zijn). Een uitgebreide inventarisatie van deze gegevens valt buiten het doel van dit onderzoek.

### 1.3.1 Rare Earths/Rare Earth Oxides

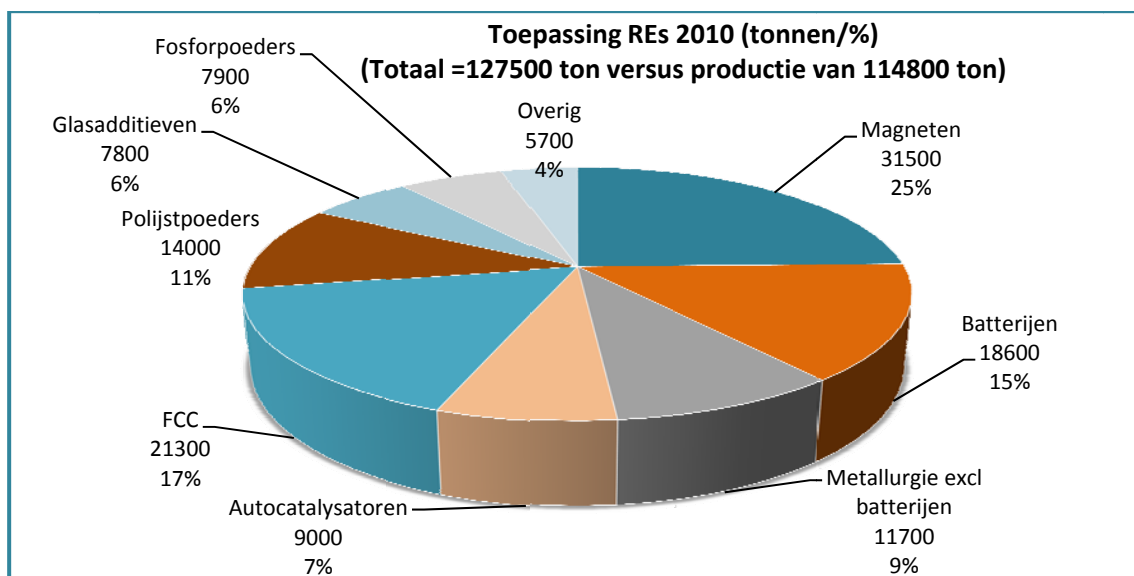
De wereldproductie (mijnbouw en recycling) van RE/REOs bedroeg in 2010 in totaal 114800 ton (REO)[8] (zie Appendix A Tabel A - 2).

- 103300 ton hiervan is in China geproduceerd.
- De vraag naar REOs was in 2010 127500 ton.
- 6% hiervan wordt voor de productie van fosfor-/fluorescerende poeders gebruikt (~7900 ton) en 15% (~18600 ton) voor batterijen (zie Figuur 5).
- De vraag overtreft de productie/aanbod van REOs, er is een tekort van ongeveer 12700 ton [8] (Tabel A - 3 Appendix A geeft de gegevens voor vraag en toepassing voor 2010 en 2014).

Vanwege de natuurlijke onevenredige concentratie/aanwezigheid van de verschillende REOs in de diverse mijnen/ertsen/concentraten verschilt de productie versus vraag bovendien voor de verschillende REOs [8] (zie Tabel A - 4 in Appendix A):

- Voor 2014 is er een tekort voorspeld voor Lanthanum (13800 ton), Europium (165 ton), Terbium (350 ton) en Yttrium (3300 ton) en een overschot van Cerium (13500 ton).
- Het totale tekort aan REOs in 2014 is geschat op 21000 ton.

Figuur 5 geeft een overzicht voor de productie versus vraag van de diverse REOs en totaalvraag. Daarnaast toont Tabel A - 5 in Appendix A het gebruik van verschillende REO in deze toepassingen.



Figuur 5: Vraag en toepassing REs in 2010 (in tonnen en % van totaalvraag)

### 1.3.2 Overige kritische grondstoffen

Tabel 3 toont de gegevens voor wereldproductie van een aantal kritische stoffen en andere metalen versus de wereldvraag hiervoor in EEE (electric and electronic equipment) (in 2006) beschikbaar vanuit de literatuur. Tabel A - 6, Tabel A - 7 en Tabel A - 8 in Appendix A geven aanvullende gegevens voor wereldproductie en vraag vanuit opkomende technologieën voor de kritische grondstoffen in 2006 en een voorspelling voor 2030.

Tabel 3: Wereldproductie, toepassing in EEE en wereldreserves voor een aantal (kritische) materialen [2], [9] en [10]

Metaal	Primaire productie (wereld)	Bijproduct van	Vraag voor EEE	Vraag/productie	Wereldreserve
	t/y		t/y	%	(*1000t)
Ag	20000	Pb, Zn	6000	30	400
Au	25000	Cu	300	12	47
Pd	230	PGM	33	14	-
Pt	210	PGM	13	6	
Ru	32	PGM	27	84	
Cu	15000000		4500000	30	540000
Sn	275000		90000	33	5600
Sb	130000		65000	50	2100
Co	58000	Ni, Cu	11000	19	6600
Bi	56000	Pb, W, Zn	900	16	320
Se	1400	Cu	240	17	
In	480	Zn, Pb	380	79	

Diverse literatuurbronnen geven aan dat 80% van de wereldvraag naar Indium afkomstig is van LCD schermen, meer dan 80% van het Ruthenium wordt gebruikt in elektronica (hard-disk) en rond 50% van de vraag naar antimoon wordt toegepast als vlamvertrager in elektronische apparaten en componenten. Inzicht in de aanwezigheid en recycling van de kritische grondstoffen aanwezig in E-waste is dan ook van belang.



## 2. Kwantificering kritische stoffen in E-waste (voor een geselecteerd aantal producten/componenten)

Om een beeld te krijgen van de kwantitatieve rol van E-waste (en de recycling hiervan) is het kwantitatieve voorkomen van kritische elementen voor een geselecteerd aantal producten/componenten bepaald. Aan de hand van de toepassingen van de kritische materialen en een discussie van de terugwinning/verliezen van deze materialen in de recycling van deze producten zijn de mogelijkheden en beperkingen van de recycling van E-waste ter ondersteuning van een duurzaam materiaalgebruik en terugwinning van kritische grondstoffen in meer detail toegelicht.

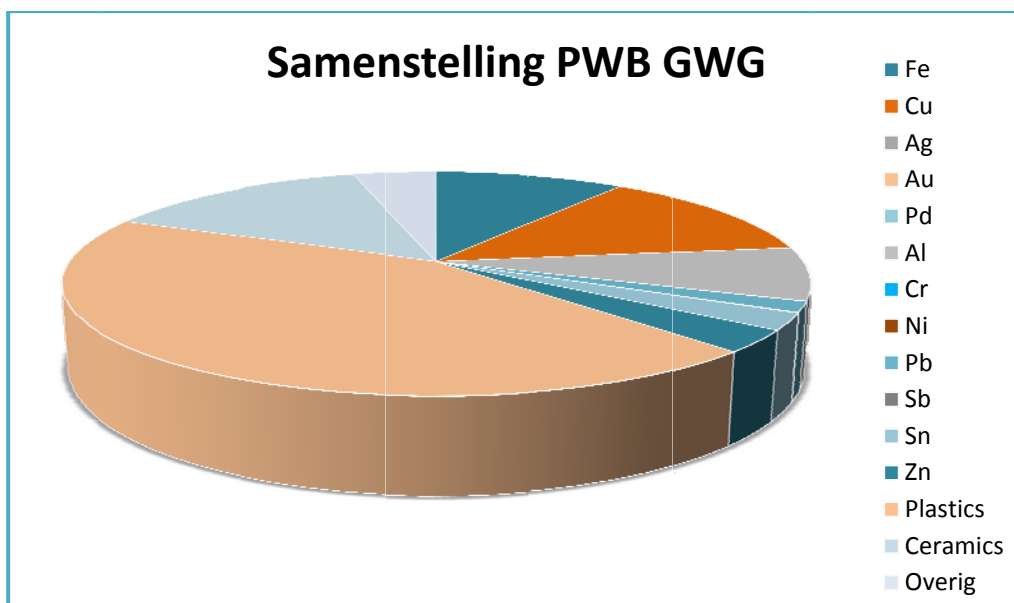
### 2.1 Kritische stoffen in Wasmachines en ander Groot Witgoed

Wasmachines en andere grootwitgoed (GWG) apparaten waaronder wasdrogers, vaatwassers en ovens bestaan uit de volgende materialen (zie Tabel B - 1 en Tabel B - 2 in Appendix B) :

- Metalen (staal, koper, aluminium, RVS en hun legeringen);
- Organische materialen zoals diverse typen kunststoffen (incl. additieven, vullers, stabilisatoren, etc.), rubber, hout, textiel, vezels, etc.;
- Inerte materialen waaronder glas en beton (incl. ferriethoudend beton);
- Printplaten en elektronica (veelal laagwaardig, d.w.z. laag gehalte aan PMs en PGMs).

De gemiddelde materiaalsamenstelling en het gewicht van (afgedankte) apparaten varieert als functie van merk, type, productiejaar van het apparaat, veranderend productontwerp en technologische ontwikkeling. Het mengsel van apparaten dat wordt afgedankt en wordt gerecycled op een bepaald moment in tijd, bij een zekere verwerker is direct van invloed op de gemiddelde productsamenstelling voor recycling en hiermee op de recyclingprestatie (zoals geïllustreerd door Van Schaik en Reuter voor auto's [11]). De samenstelling en het gewicht van wasmachines en het voorkomen van eventuele kritische stoffen hierin varieert als gevolg hiervan. Tabel B - 2 in Bijlage B toont de variatie in gewicht en samenstelling van een wasmachine en GWG op basis van diverse literatuurgegevens.

De kritische materialen die aanwezig zijn in GWG bevinden zich voornamelijk op de printplaten. Figuur 6 toont de gemiddelde samenstelling van printplaten in GWG [12]. Volgens deze data bevatten de printplaten in GWG gemiddeld 20 ppm Palladium (Pd), 160 ppm Ag en 38 ppm Au.



Figuur 6: Gemiddelde samenstelling printplaat in GWG [12]

### 2.1.1 Kwantificering hoeveelheid kritische stoffen in GWG

Inzamelgegevens van Wecycle leveren in combinatie met de gemiddelde materiaalsamenstelling van wasmachines en GWG (Tabel 4) en de gemiddelde samenstelling van de printplaten (Figuur 6) een beeld van de absolute hoeveelheid PMs en PGMs per apparaat en in het ingezamelde en verwerkte GWG in 2010. Vanwege de spreiding in gewichten en samenstelling, is de aanwezigheid en hoeveelheid ingezamelde kritische stoffen in GWG als bandbreedte berekend.

Tabel 4: Berekende hoeveelheden kritische materialen in wasmachines en Groot Witgoed.

Kritische materialen (PGM tevens PM getoond) in wasmachines en Groot Witgoed (per apparaat en totalen in ingezameld in 2010)				
	Wasmachine per apparaat	GWG per gemiddeld apparaat	Wasmachines ingezameld 2010	GWG ingezameld 2010
	[mg]	[mg]	[kg]	[kg]
Ag	41 – 50	0.12 – 33	11 – 12	0.0 – 17
Ag	9.8 – 12	0.03 – 7.9	2.7 – 2.9	0.0 – 4.1
Pd	5.1 – 6.3	0.01 – 4.2	1.3 – 1.5	0.0 – 2.2

### 2.1.2 Terugwinning/verliezen kritische grondstoffen in recycling GWG

Het verwerkingsproces van GWG is geconcentreerd op het terugwinnen van de bulkmaterialen uit het GWG conform de WEEE richtlijn. Voor printplaten geldt het volgende:

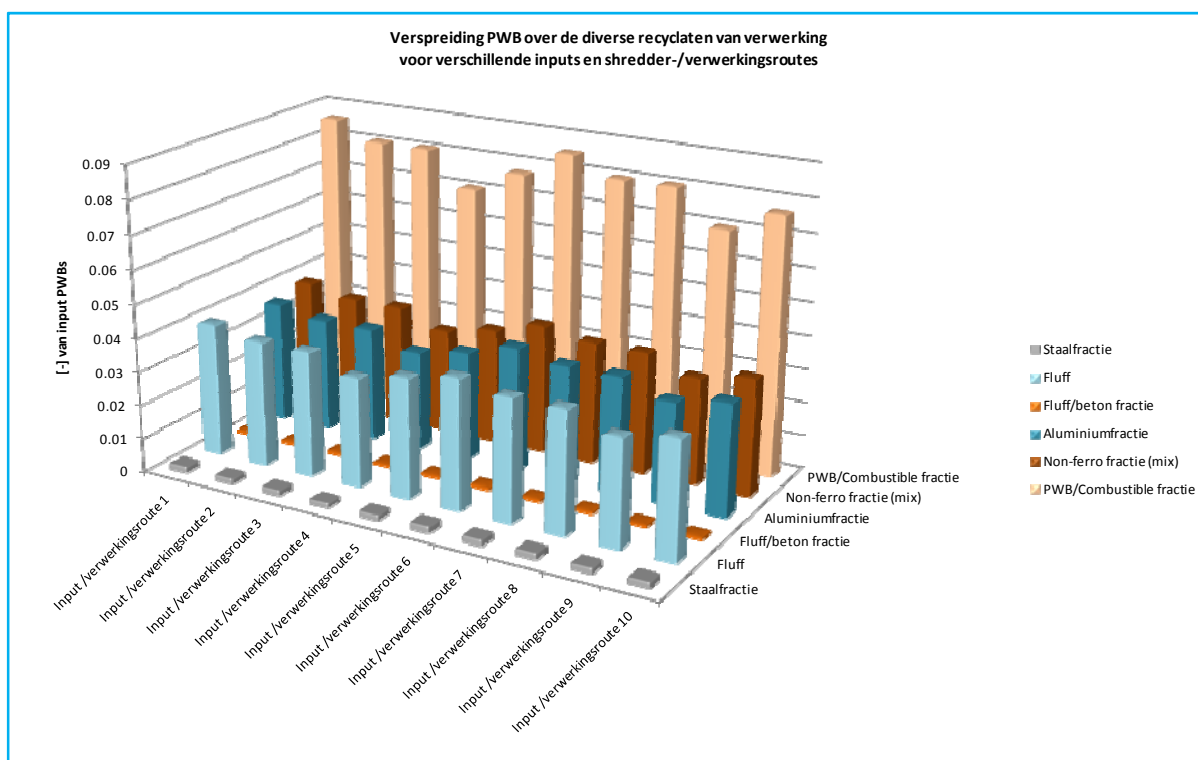
- Printplaten vormen een dusdanig klein gedeelte van de GWG stroom (zie Tabel B - 1 en Tabel B - 2 in Appendix B), dat gescheiden terugwinning hiervan niet of nauwelijks plaatsvindt (mede vanwege de massagedreven recyclingrichtlijn). De lage concentratie printplaten verantwoordt geen afzonderlijke scheiding hiervan.
- Vanwege de technologische limitaties (fysica) van de scheidingsprocessen zal een onvoldoende zuivere stroom printplaten afgescheiden kunnen worden, die de terugwinning van kritische materialen in metallurgische eindverwerkingsprocessen (metaalsmelter) mogelijk maakt.
- Printplaten zullen zich verspreiden over de recyclaten van de 'commodity' materialen (ijzer/staal, aluminium, etc) en als onvermijdbare verontreiniging in deze stroom aanwezig zijn en als zodanig verloren gaan voor terugwinning van de kritische elementen (hetzij naar de slak of als verontreiniging in het 'commodity' metaal (bijv. koper in staal). (zie [13] en [14]) voor een

toelichting over de technologische beperkingen van mechanische en metallurgische recyclingtechnologie).

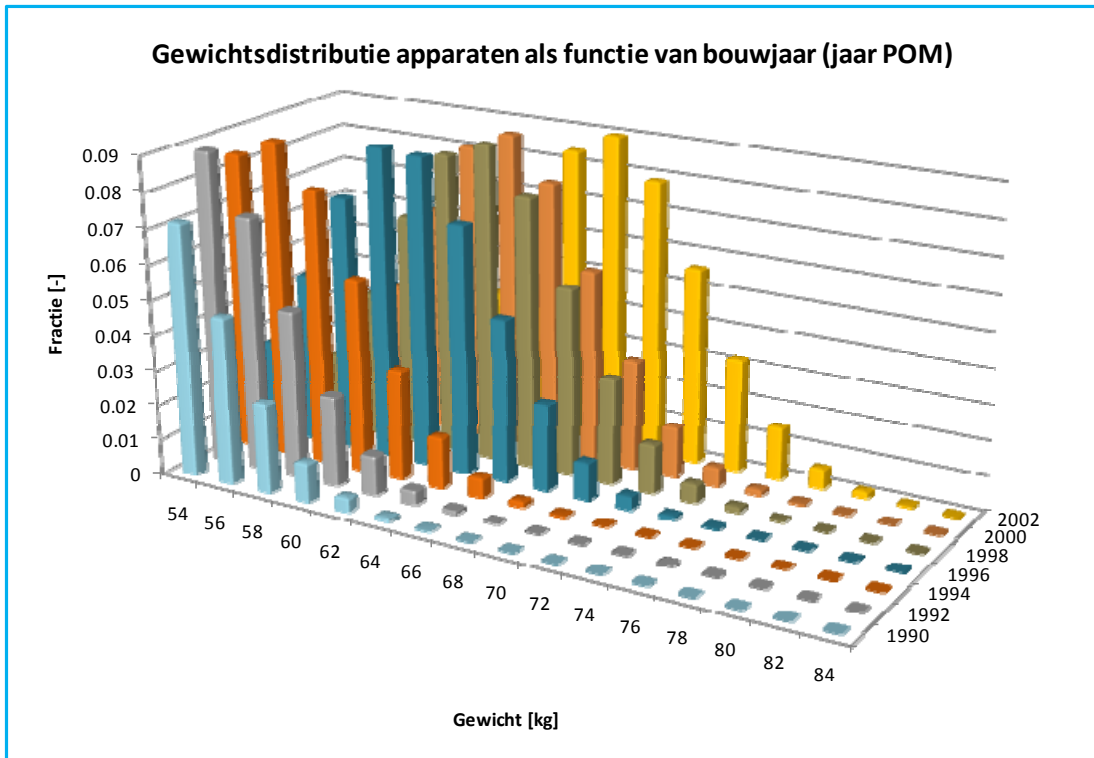
MARAS heeft recyclingmodellen ontwikkeld waarmee de recycling/recoveryprestatie, inclusief de samenstelling van de recyclaten voor alle - in een product aanwezige - materialen (zowel fysisch voorkomen en op basis van chemische fases) wordt berekend [13]. Figuur 7 toont aan hoe de printplaten (en hierin aanwezige kritische stoffen) uit GWG zich verdelen over verschillende recyclaatstromen (berekend met de ontwikkelde modellen). Alleen de printplaten en kritische stoffen hierin, die in de non-ferro fractie eindigen, kunnen eventueel worden teruggewonnen, mits deze fractie in een geïntegreerde koper/loodsmelter wordt verwerkt (zie paragraaf PWB verwerking).

### Terugwinningsmogelijkheden en -percentages over tijd

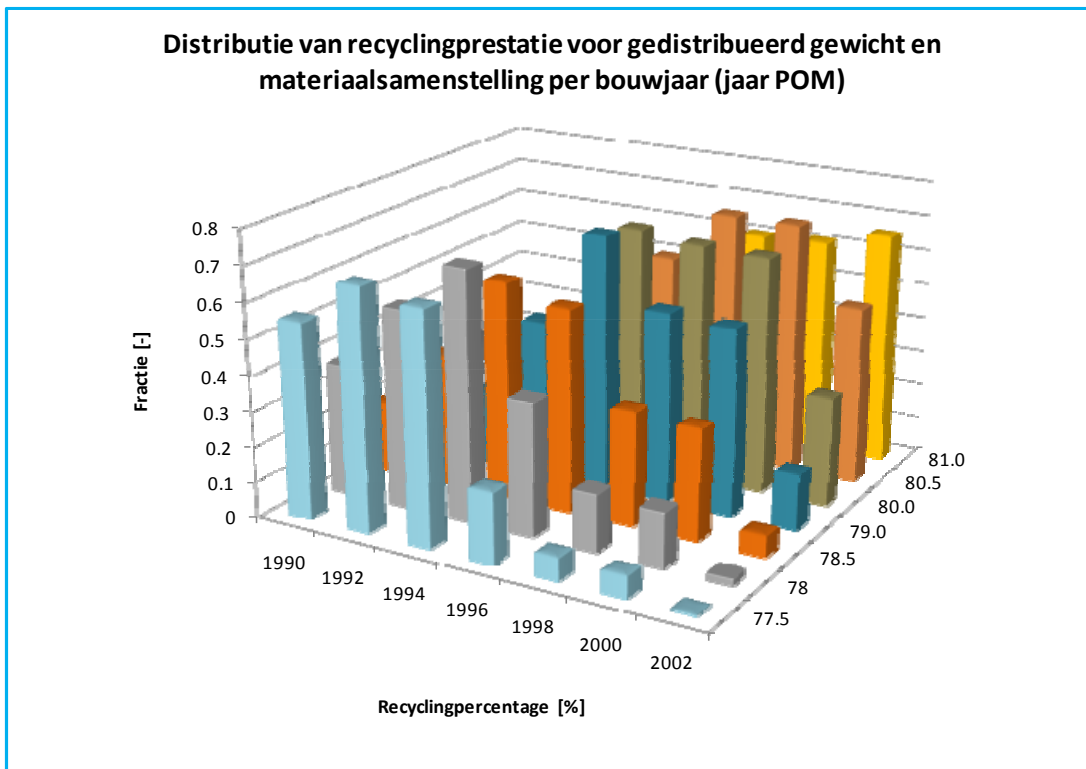
Figuur 8 en Figuur 9 laten zien dat met de gewichtsdistributie van de afgedankte apparaten en bijbehorende samenstelling (bijvoorbeeld als functie van bouwjaar) de distributie van de te behalen recyclingprestatie kan worden voorspeld. Samen met verspreiding van levensduur kan deze gewichtspreiding (gekoppeld aan bouwjaar/afdankejaar) en variatie/spreiding in de samenstelling van het product worden gebruikt om de aanwezigheid en recycling van kritische stoffen over tijd te kwantificeren. Van Schaik en Reuter hebben dit in het verleden al gedaan voor het recyclingpercentage van auto's [11].



**Figuur 7 : Verspreiding van printplaten over de verschillende recyclaten van GWG verwerking voor verschillende inputs van verwerking en verwerkings-/shredderroutes berekend met het door MARAS voor Wecycle ontwikkelde recyclingmodel**



Figuur 8: Voorbeeld gewichtsverdeling apparaat als functie van bouwjaar (indicatieve waarden ter illustratie)



Figuur 9: Voorbeeld berekende verdeling voor de recyclingprestatie (en hieraan gekoppelde recycling van bijv. kritische materialen) voorspeld met door MARAS voor NVMP/Wecycle ontwikkelde recyclingmodellen als functie van gewichtsverdeling apparaten (zie Figuur 8) en materiaalsamenstelling (indicatieve waarden ter illustratie)

## 2.2 Kritische materialen (REOs) in Verlichting

Lampen en LED's bevatten een veelheid aan materialen en vormen een bron van zeldzame aarden (Yttrium, Lanthanum, Cerium, Europium, Terbium en Gadolinium [6], voornamelijk aanwezig in de fosfor-/fluorescerende poeders) en een aantal andere kritische grondstoffen (waaronder Indium en Gallium en Wolfram)[15]. Fluorescerende-/fosforpoeders worden voor het merendeel toegepast in fluorescerende lampen en LED verlichting. De analyses en berekeningen in dit hoofdstuk refereren hiernaar. Germanium (Ge) kan voorkomen in fluorescerend poeder van hogedruk kwiklampen. Indium kan worden toegepast als coating in (lage druk) natriumlampen. Tevens kunnen Wolfram en Tantalum aanwezig zijn in de lampen. Dit verslag richt zich, vanwege hoeveelheden en beschikbare kwantitatieve gegevens, specifiek op de zeldzame aarden. Samengevat bestaan lampen uit de volgende materialen ([15], [16] en [17]).

- Metalen (W incl. K,ThO<sub>2</sub>,Re;Mo,Fe,Ni,Cr,Cu,Nb,Na,Hg,Zr,Al,Ba,Ni,Ta,Al,Zn)
- Omhulsel - diverse soorten glas (SiO<sub>2</sub>,Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O,B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,MgO,CaO,BaO,PbO,SrO)
- Fluorescerende poeders bevatten onder andere Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(Cl,F), BaMgAl<sub>10</sub>O<sub>17</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, LaPO<sub>4</sub>, Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, YVO<sub>5</sub>, etc. met metaalionen (e.g. Pb<sup>2+</sup>/Mn<sup>2+</sup>/Sb<sup>3+</sup>) of zeldzame aarden (e.g. Eu<sup>2+</sup>/Tb<sup>3+</sup>/Ce<sup>3+</sup>) als activator; LED's bevatten: AlGaInP; InGaN; InGaN + (YAG:Ce) en InGaN+fosfor.
- Speciale materialen zoals getters (incl. W), amalgamen, emittoren, verven, cementen, etc.

Op basis van gegevens afkomstig uit diverse literatuurbronnen voor:

- materiaalsamenstelling van diverse typen lampen (en hoeveelheid/% aanwezige fluorescentiepoeders) (zie Tabel C - 1 in Appendix C);
- gewichtsgegevens voor verschillende soorten lampen (zie Tabel C - 2 in Appendix C); en
- diverse/variërende samenstellingmogelijkheden van de (drieband) fluorescentiepoeders en de verhoudingen/concentraties van de diverse REOs hierin voor de verschillende typen fluorescerende lampen (waaronder Y<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Tb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (zie Tabel C - 3, Tabel C - 4 en Tabel C - 5 en de verdere toelichting in de Appendix C);

is een berekening gemaakt van de gemiddelde (bandbreedte) en de gewichten en aanwezigheid van fluorescerende poeders en REOs in Verlichting.

**Let wel:** Vanwege het variërend gewicht en variërende samenstelling van de afzonderlijke typen lampen (variërend aandeel poeders en wisselende samenstelling/mix van typen poeders/REO hierin) en variërend aandeel van de verschillende verlichtingstypen (TL, spaarlamp etc.) in de afgedankte stroom, zijn de te verwachten hoeveelheden REOs per lamp en totaalhoeveelheden op basis van een bandbreedte berekend. Veranderde verhoudingen van gebruikte REs in poeders en nieuwe ontwikkelingen kunnen deze getallen beïnvloeden.

Voor LED lampen is geen of niet voldoende (openbare) kwantitatieve data beschikbaar. Deze zijn niet meegenomen in de kwantificering van kritische stoffen in Verlichting (zie kwalitatieve gegevens Tabel C - 6 in Appendix C).

### 2.2.1 Kwantificering kritische stoffen in (afgedankte) verlichting

De gemiddelde hoeveelheid REOs in de fluorescerende/fosforpoeders in lampen is op basis van de diverse literatuurgegevens (zie Tabel C - 1 t/m Tabel C - 5, Appendix C) berekend op 0.2–2.3 gram/lamp (laagste waarde voor lampen met een aandeel fosforpoeders van 0.3% en minimum lampgewicht van 0.07 gram) (zie Tabel 5).

**Tabel 5: Samenvatting gegevens verlichting (literatuurdata) en berekende hoeveelheid REO per lamp**

Literatuur en berekende gegevens per lamp		
Gemiddeld gewicht lamp (zie Tabel C - 2)	[kg]	0.07 – 0.2 kg
% Fluorescerende poeders in lampen (zie Tabel C - 1)	[%]	0.3 – 2.9 %
<b>Berekende gemiddelde hoeveelheid REOs/lamp</b>	[gram]	0.2 – 2.3 gram

Tabel 2 toont voor 2010 de hoeveelheid REOs in de afgedankte en ingezamelde verlichting in Nederland versus Europa en de relatieve bijdrage van Nederland (Tabel I - 4 Tabel I - 1 zijn alle ingezamelde TL en spaarlampen meegenomen, in Tabel 6 alleen de fluorescerende lampen).

**Tabel 6: Berekende hoeveelheden REO in afgedankte verlichting Nederland en Europa (allen voor lampen met fluorescerende poeders in de Cat. 5 Verlichting) (gebaseerd op berekende gegevens gewicht REO/lamp uit Tabel 5)**

Hoeveelheid REOs in afgedankte populatie Verlichting Nederland en Europa (2010) (Cat. 5 Verlichting met fluorescerende poeders)		
Afgedankt gewicht Verlichting Nederland (fluorescerend)	1,528,273 [18] <sup>a</sup>	[kg]
Totaal kg REOs Nederland (berekend)	2,314 -24,827	[kg]
Afgedankt gewicht Verlichting EU27 2010	44,489,000 [19] – 77,000,000 [12]	[kg]
Totaal kg REOs EU27 2010 (berekend) <sup>b</sup>	67,374 – 1,250,899	[kg]
Aandeel REOs Nederland versus Europa (2010) (berekend)	2.0 – 3.4%	[%]

<sup>a</sup>Corresponderend met 11,273,167 items (#); <sup>b</sup>Berekend op basis van gemiddeld gewicht REO/ingezameld kg Verlichting Cat. 5; hierbij is de aanname gemaakt dat de End-of-Life populatie (aandeel diverse soorten lampen) binnen EU vergelijkbaar is met Nederland (daadwerkelijke waarden kunnen afwijken vanwege afwijkende populatiesamenstelling)

Tabel 7 toont de wereldproductie, vraag en toepassing van REO in 2010 en de bijdrage van de REO uit de fluorescentiepoeders zoals vrijgekomen in Nederland in 2010 (conform Tabel 6).

**Tabel 7: Productie, vraag en toepassing REO in 2010 in relatie tot hoeveelheid REO Nederlandse afgedankte verlichting (2010)**

Productie, vraag en toepassingen REOs 2010	EU27	Wereld	
Items (aantal lampen)	776,000,000 <sup>a</sup> [12] – 988,000,000 [20]	6,512,000,000 [15]	#
Gemiddeld kg REO in productie lampen 2010 (berekend)	934,170 – 1,189,381	7,839,324 <sup>b</sup>	[kg]
Productie REO 2010		114,330,000 [8]	[kg]
Vraag REO 2010		127,500,000	[kg]
Toepassing REOs in fluorescerende poeders (% van vraag)		6%	[%]
Kg REO toegepast in fluorescerende poeders		7,650,000 <sup>b</sup>	[kg]
% REOs in Nederland afgedankte Verlichting 2010 versus wereldproductie 2010 (berekend)	0.03 - 0.32 %		[%]

<sup>a</sup>Data 2007. <sup>b</sup>De berekende gemiddeldes voor REO productie in lampen (op basis van berekende gram REO/lamp) en literatuurgegevens corresponderen met elkaar.

### 2.2.2 Terugwinning/verliezen kritische grondstoffen in recycling Verlichting

De fluorescerende poeders (fosfors) kunnen worden afgescheiden uit de lampen [21], zoals ook gebeurt bij de verwerkers van Wecycle/LightRec [22] en [23] (zie Figuur C - 3). Afhankelijk van de mix van ingezamelde typen lampen, zal het poeder een mengsel zijn van de verschillende bestanddelen, met een variërend gehalte en samenstelling van RE(O)s, zoals is weergegeven in de Appendix C. Door verwijdering uit de 'tube'/glas kunnen de REOs worden geconcentreerd in de afgescheiden poeders. Op dit moment vindt geen verdere verwerking/hergebruik plaats van de afgescheiden poeders en/of REOs hieruit.

Terugwinning van de REOs uit deze poeders vereist eindverwerking, waarbij de REOs worden afgescheiden van de overige bestanddelen uit het poeder (zie Tabel C - 3 en Tabel C - 5) en deze als REOs worden herwonnen. Dit is mogelijk door middel van hydrometallurgische verwerking [17].

Terugwinning van onder andere REs uit deze poeders vereist echter de beschikbaarheid van passende (hydro)metallurgische verwerkingsprocessen binnen Europa. Binnen de Europese Unie worden weinig REs geproduceerd en ontbreekt deze infrastructuur. Op dit moment wordt 97% van de REs geproduceerd in China en vindt deze terugwinning niet plaats binnen Europa [2].

### 2.2.3 Opbrengsten REOs

Tabel 8 geeft de prijzen voor de verschillende REOs (selectie voor REO in lampen) in 2010 (\$/kg). Dit toont aan dat fluorescerende poeders een aantal kostbare REOs kunnen bevatten. Verwerking/terugwinning hiervan zou, mits voldoende materiaal en een verwerkingsinfrastructuur/-technologie aanwezig is, vanuit een economisch perspectief bekeken kunnen worden.

Tabel 8: Prijzen REOs (Nov 2010) [19]

Rare Earth Oxide	Prijs (\$/kg)	
Cerium	59	62
Europium	585	605
Lanthanum	55	58
Terbium	595	615
Yttrium	53	70

### 2.2.4 Alternatieven voor RE(O) in fosforpoeders Verlichting en (CRT) TVs

USGS [24] geeft aan dat Yttrium in fosforpoeders niet vervangen kan worden door andere elementen.  $Mn^{2+}$  wordt genoemd als een mogelijk alternatief voor Terbium [25] (met verlaging van kwaliteit). Een potentiële afname van 40% voor de consumptie van Tb is voorspeld [26] als gevolg van technologieontwikkeling in verlichting. U.S. department of energy [27] geeft aan dat er geen bewezen vervangingsmateriaal is voor Europium in fluorescerende lampen en in rode fosfor voor CRT TV's. Volgens dezelfde bron kunnen toekomstige OLEDs echter vrij zijn van REs. LED technologie kan de vraag naar Lanthanum en Terbium doen afnemen, terwijl het gebruik van en de vraag naar Cerium en Europium zal blijven bestaan.

## 2.3 Kritische stoffen in Printplaten (Printed Wire Boards – PWBs)

Printplaten bevatten een aantal 'kritische' materialen afhankelijk van het type apparaat en type printplaat. De volgende 'kritische' materialen worden in verschillende concentraties aangetroffen: PGMs, PMs, Sb en Ta [28]. Tevens worden REs toegepast in een veelheid aan elektronische keramische (diëlektrische) componenten, die worden gebruikt op onder meer printplaten (lanthanum en neodymium). Een printplaat afkomstig van een PC bevat gemiddeld 7% Fe, 5% Al, 20% Cu, 1.5% Pb, 1% Ni, 3% Sn en 25% organische bestanddelen, samen met 250 ppm Au, 1000 ppm Ag en 100 ppm Pd. Bovendien zijn sporen van As, Sb, Ba, Br en Bi aanwezig [9]. De beschikbare (literatuur)-analyses van printplaten en/of van de genoemde apparaten geven echter geen kwantificering van de aanwezigheid van de REs. Alleen [29] geeft een complete analyse van een PC, waarin tevens REs zijn geanalyseerd (zie Tabel D - 1, Appendix D).

De samenstelling van printplaten is sterk afhankelijk van het type apparaat waarin deze zijn toegepast; het productiejaar van het product, etc. De samenstelling en het gehalte aan kritische materialen in printplaten kan aanzienlijk variëren [12]. Tabel D - 2 (Appendix D) geeft een overzicht van gemiddelde samenstellingen van printplaten toegepast in diverse 'WEEE treatment categories'. Hierbij dient te worden opgemerkt dat de samenstelling van de printplaten voor de verschillende producten binnen deze categorieën tevens kan verschillen (en zal variëren over tijd).

Tabel D - 3 geeft een overzicht van de samenstellingen van PWBs en het gehalte aan PWB voor verschillende apparaten op basis van diverse literatuurbronnen.

### 2.3.1 Kwantificering kritische stoffen in printplaten in E-waste

Aan de hand van de beschikbare gegevens is voor een aantal OWEB producten de hoeveelheid aanwezige kritische stoffen per apparaat in de PWBs en voor het totaal ingezameld in Nederland in 2010 berekend. Tabel 9 geeft de berekende waarden (Au en Ag zijn tevens meegenomen hierin). Figuur 10 geeft een indicatie van de verhoudingen van de aanwezige PGMs en PMs in verschillende producten, tevens in vergelijking tot een gemiddelde samenstelling van een kopererts.

Tabel 9 : Berekende hoeveelheden (bandbreedtes) kritische stoffen in PWBs van diverse OWEB producten

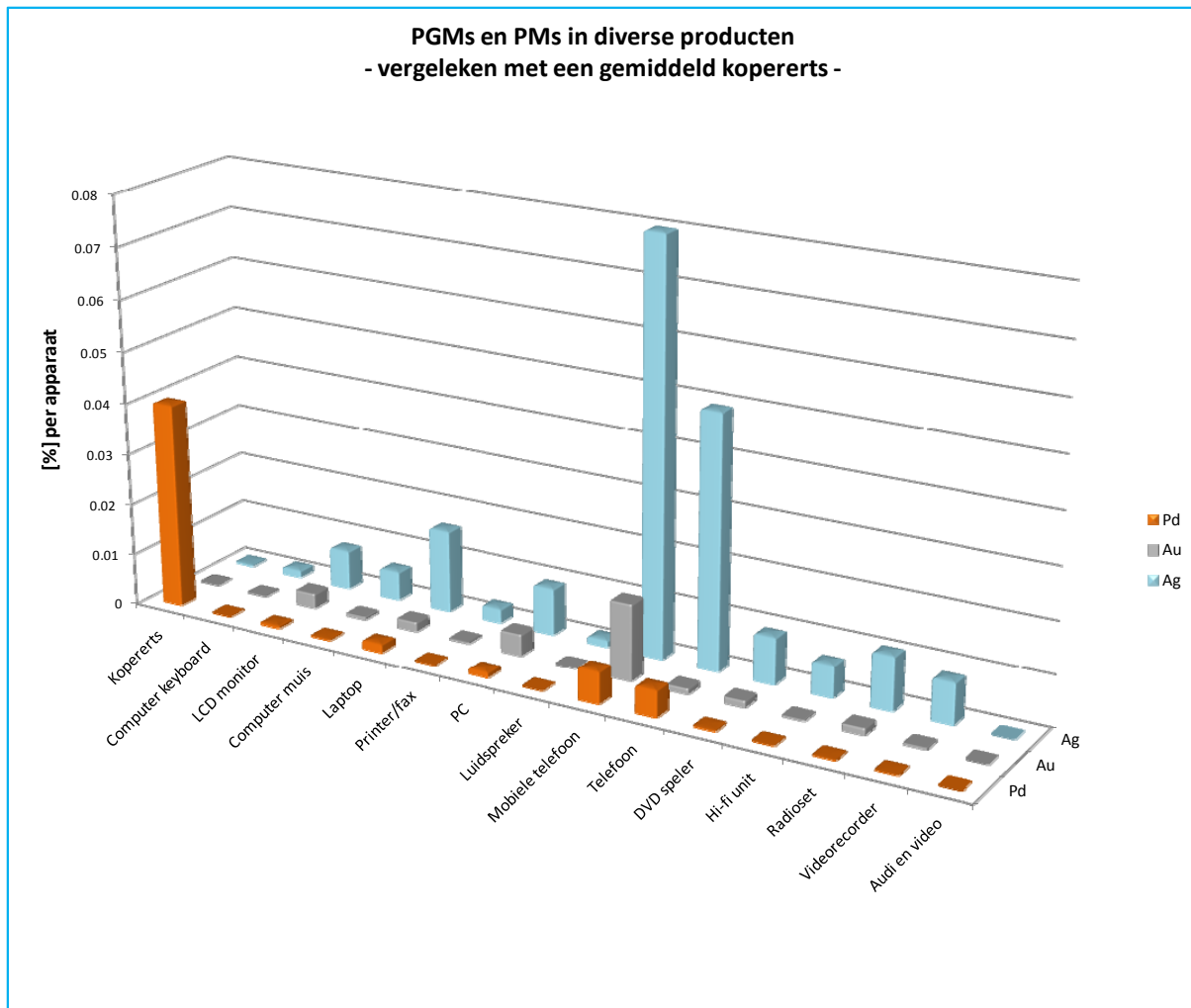
Product/apparaat	Videorecorder	DVD speler	Hi-fi unit	Radioset	
Gemiddeld gewicht	4.0 – 6.4	3.0 – 3.4	4.2 – 5.1	5.1 – 6.2	[kg]
% PWB in product	10 - 14	10 – 16	8.0 – 11	20 – 21	[%]
Hoeveelheid Ag in product	0.27 – 0.60	0.21 – 0.39	0.22 – 0.36	0.53 – 0.66	[gram]
Hoeveelheid Au in product	0.01 – 0.03	0.03 – 0.06	0.01 – 0.02	0.07 – 0.09	[gram]
Hoeveelheid Pd in product	0.00 – 0.01	0.00 – 0.01	0.00 – 0.01	0.00 – 0.01	[gram]
<b>Hoeveelheden ingezameld 2010</b>					
Afgedankt Nederland 2011 (gewicht)	945333	635509	1467441	1191852	[kg]
Totale hoeveelheid Ag 2010	64 – 89	45 – 72	79 – 104	124 – 128	[kg]
Totale hoeveelheid Au 2010	2.9 – 4.1	6.4 – 10	3.7 – 4.8	16 – 17	[kg]
Totale hoeveelheid Pd 2010	0.9 – 1.3	1.3 – 2.2	1.2 – 1.6	1.9 – 2.0	[kg]

### 2.3.2 Terugwinning/verliezen kritische grondstoffen in recycling van printplaten

Printplaten vormen een geïntegreerd onderdeel van elektrische apparaten; ze zijn zeer complex, bestaan uit een groot aantal verschillende materialen/elementen/componenten, zijn verbonden aan andere materialen in een product en zijn vaak laag in gewichtsaandeel (in verhouding tot andere aanwezige materialen/grondstoffen – zie ook Tabel D - 3). Het terugwinnen van de grondstoffen hieruit (PGMs, PMs etc.) vereist concentratie van de printplaten uit deze multi-materiaal producten tijdens demontage en/of fysische verwerking om verdere opwerking/terugwinning in metallurgische eindverwerkingsprocessen mogelijk te maken (zie Figuur 11). De mate van terugwinning van de verschillende stoffen is dan ook afhankelijk van de verwerkingsroute. In een product worden bovendien vaak materiaalcombinaties gebruikt die niet altijd allen gelijktijdig terug te winnen zijn in metaalsmeltprocessen indien deze niet van elkaar (kunnen) worden gescheiden tijdens demontage en/of sortering. Hierdoor kan een deel van de materialen verloren gaan (zie Figuur 4 en Tabel I - 5). Verliezen van PWBs en hierin toegepaste kritische materialen treden op door het verloren gaan van printplaten naar recyclaten van de 'commodity' materialen uit deze producten (zie GWG). De recycling van deze apparaten is hier, door de gewichtsgedreven EU recyclingdoelstellingen, veelal op



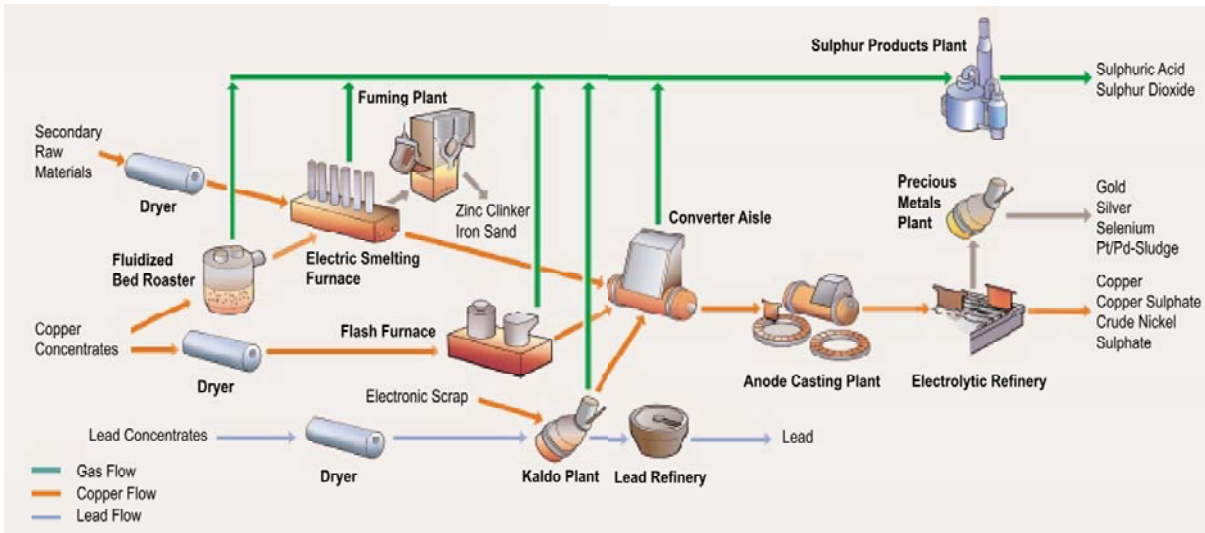
geconcentreerd. Uit het OWEB (overige wit- en bruingoed) wordt een deel van de printplaten en hierop aanwezige stoffen terugwonnen.



**Figuur 10 : PGMs en PMs in diverse producten (% van totaal apparaat), tevens vergeleken met een gemiddeld kopererts (Pt is niet getoond in verband met het relatief lage gehalte in de producten)**

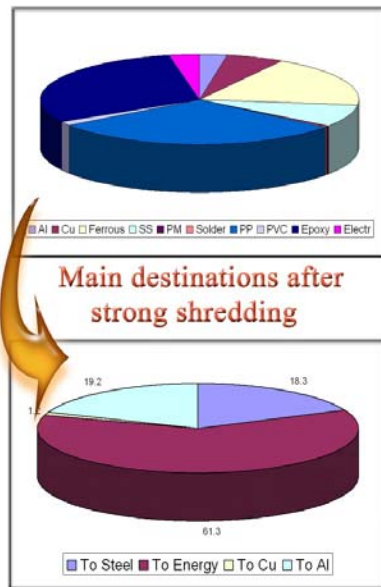
MARAS toont op basis van ontwikkelde recyclingmodellen voor E-waste de terugwinning en verliezen van verschillende metalen in een printplaat voor verschillende recyclingroutes (demontage en direct smelten, versus diverse intensiteiten van shredderen en sorteren). Figuur 12 toont aan dat hoge recyclingpercentages voor de kritische (PMs/PGMs) materialen kunnen worden behaald als de printplaten direct naar de smelter gaan, zonder verdere shredding en sortering. Deze bevindingen worden ondersteund door industriële testen [30] en [31].

Printplaten en/of printplaathoudende fracties/stromen zoals IC's, processors, connectoren en kleine elektrische apparaten zoals mobiele telefoons, MP3 spelers etc. kunnen, na verwijdering van de batterij, direct worden opgenomen in een geïntegreerde koper/precious metal smelter-refinery (zie Figuur 11), zonder dat enige verdere verkleining van het materiaal noodzakelijk is [9].

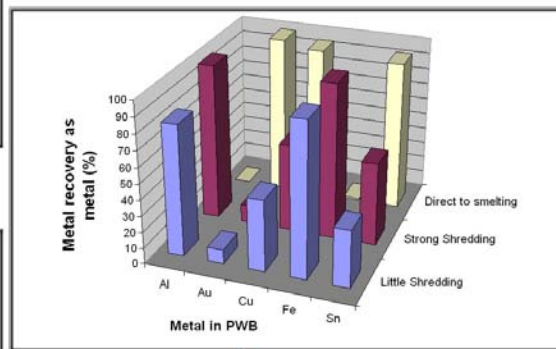


Figuur 11: Metallurgische verwerking van o.a. printplaten en E-waste in een geïntegreerde smelter [32]

### Main PWB Materials



### Metal recycling % vs. shredding type



Figuur 12: Metaal recyclingpercentages voorspeld door het recycling model voor verschillende metalen in de recycling van (ontmantelde) printplaten (PWBs) hetzij direct verwerkt in een (geïntegreerde) kopersmelter, hetzij geshredderd met een variërende intensiteit. Let op de lage recovery van goud en koper voor shredding en de hoge recyclingwaarden wanneer de PWB direct in de smelter worden verwerkt, zonder shredderen en sorteren [13].

Belangrijk is te realiseren dat bij de verwerking van PWBs in hoog-temperatuur (pyrometallurgische) processen de REs in het algemeen in de slak terecht komen en zo worden onttrokken aan de materiaalketen. Metallurgische slakken vinden veelal toepassing als bouw materiaal, in dijken, etc. waardoor de REs en andere aanwezige materialen niet terug worden gewonnen. Hoog-temperatuur verwerking van RE houdende materialen dient vermeden te worden. Indien verschillende kritische stoffen met elkaar gecombineerd zijn in een product en niet kunnen worden gescheiden tijdens demontage, shredderen en/of sortering, kan het voorkomen dat een keus voor terugwinning van de ene stof ten opzichte van de andere moet worden gemaakt en het verloren gaan van materialen onvermijdelijk is.

## 2.4 Kritische stoffen in CRT TV's

CRT TVs bevatten kritische materialen zoals aangemerkt in Tabel 1, waaronder REs/REOs in de fluorescerende/fosforpoeders en PGMs/PMs in de printplaten. In de getter/electronenkanon van de CRT TV wordt tevens Wolfram toegepast. Vanwege het ontbreken van kwantitatieve gegevens is deze kritische stof niet meegenomen in de berekeningen. Op basis van gegevens afkomstig uit diverse literatuurbronnen voor:

- de materiaalsamenstelling van CRT TVs (en hoeveelheid/% printplaten en fluorescerende poeders) (zie Tabel E - 1);
- gewichtsgegevens voor CRT TVs (zie Tabel E - 1);
- diverse bestanddelen/samenstellingmogelijkheden van rode fosfor/fluorescentiepoeders en de verhoudingen/concentraties van de diverse REOs hierin;

is een berekening gemaakt van de gemiddelde (bandbreedte) in de gewichten en aanwezigheid van PGM/PM en RE/REOs in de fosforpoeders.

### 2.4.1 Kwantificering kritische stoffen in (afgedankte) CRT TVs

De fluorescerende/fosforpoeders in CRT TVs bevatten REs. Rare earths worden voor CRT TVs voornamelijk gebruikt in het rode fosforpoeder in:  $YVO_4 : Eu^{3+}$  (4.5. %),  $Y_2O_3 : Eu^{3+}$  (3.5 %) en/of  $Y_2O_2S : Eu^{3+}$  (3.65 %) [16] en [17] . In de berekeningen is de aanname gedaan dat de groene, blauwe en rode fosfor in gelijke verhoudingen zijn toegepast. Afwijking hiervan geeft een andere bandbreedte voor de resultaten.

Tabel 10 geeft de gemiddelde hoeveelheid PGM/PM en REs in CRT TVs. Tabel 11 toont voor 2010 de hoeveelheden van deze kritische stoffen in de afgedankte en ingezamelde CRT TVs door Wecycle in Nederland. Met het oog op het stijgende gebruik en verkoop van o.a. LCD en plasma TVs (ten koste van CRT TVs) zal het gebruik van CRT TVs en de hieraan gerelateerde aanwezigheid van REs langzaam uitfasen [33]. Figuur 8 en Figuur 9 tonen aan hoe met behulp van de, door MARAS voor Wecycle/NVMP, ontwikkelde recyclingmodellen voorspeld kan worden hoe lang en in welke hoeveelheden nog kritische stoffen uit CRT TVs vrij zullen komen. De vervangende technologieën zoals LCD schermen bevatten echter ook kritische stoffen (waaronder In en REs). Door het ontbreken van voldoende kwantitatieve data zijn deze niet meegenomen in dit onderzoek.

**Tabel 10 : Berekende hoeveelheden (bandbreedtes) kritische stoffen in CRT TVs**

Gegevens per CRT TV (literatuur en berekend)			
	Min	Max	
Gemiddeld gewicht CRT TV	24	27	[kg]
% PWB in CRT TV	3.0	9.7	[%]
Hoeveelheid Ag in CRT (berekend)	0.20	4.1	[gram]
Hoeveelheid Au in CRT TV (berekend)	0.01	0.28	[gram]
Hoeveelheid Pd in CRT TV (berekend)	0.01	0.11	[gram]
Hoeveelheid Co in CRT TV (berekend) <sup>a</sup>	0.19	0.21	[gram]
Hoeveelheid Sb in CRT TV (berekend) <sup>a</sup>	5.20	5.75	[gram]
% fluorescerent poeder in CRT TV <sup>b</sup>	0.013	0.014	[%]
Hoeveelheid Yttrium in CRT TV (berekend)	0.37	0.50	[gram]
Hoeveelheid Europium in CRT TV (berekend)	0.03	0.05	[gram]

<sup>a</sup> op basis van slechts 1 literatuurbron

<sup>b</sup> zeer beperkte data voor % fluorescerende poeders in CRT TVs beschikbaar

Tabel 11 : Berekende hoeveelheden (bandbreedtes) kritische stoffen in CRT TV's ingezameld door Wecycle in 2010

Ingezamelde CRT TVs 2010 (Nederland)		
Afgedankt Nederland 2010 (gewicht)	20349124 [18]	[kg]
Totale hoeveelheid Ag 2010 (berekend)	171 – 3154	[kg]
Totale hoeveelheid Au 2010 (berekend)	10 – 224	[kg]
Totale hoeveelheid Pd 2010 (berekend)	6.1 – 81	[kg]
Totale hoeveelheid Co 2010 (berekend)	163	[kg]
Totale hoeveelheid Sb 2010 (berekend)	4395	[kg]
Totale hoeveelheid Yttrium 2010 (berekend)	326 – 387	[kg]
Totale hoeveelheid Europium 2010 (berekend)	26 - 41	[kg]

## 2.4.2 Terugwinning/verliezen kritische grondstoffen in recycling van CRT TV's

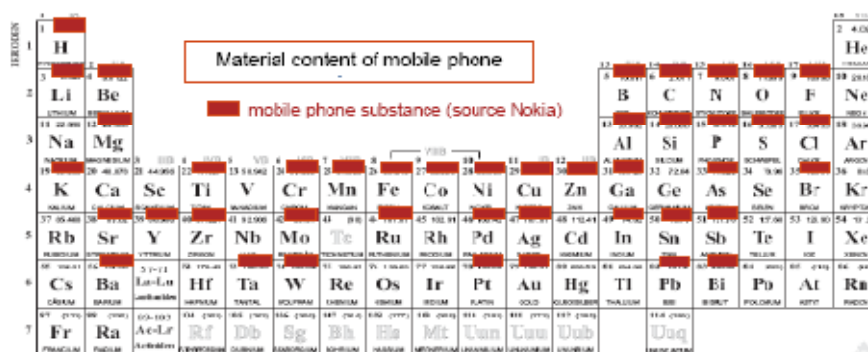
Voor de terugwinning van de REs uit de fosforpoeders in de beeldbuizen is het bij de verwerking van belang dat deze poeders separaat afgescheiden worden. Door het uitfaseren van het gebruik en verkoop van CRT TVs verdwijnt de markt voor hergebruik van CRT glas (scheiding front- en conusglas waarbij de poeders werden afgezogen), waardoor de terugwinning van de poeders zal moeten plaatsvinden, indien mogelijk, vanuit de lichte (afgezogen) shredderfractie. Alleen indien dit het geval is, kan nog terugwinning van de REs hieruit mogelijk zijn, bijvoorbeeld door hydrometallurgische processen [17]. De (hydro)metallurgische infrastructuur hiervoor (hydrometallurgische verwerkingsplants) is echter niet aanwezig binnen Europa.

Wolfraam en Tantaal zoals aanwezig in de getter zijn zeer oxidische materialen. Zij gaan naar de slak indien verwerkt in een niet passende eindverwerkingstechnologie voor deze materialen (bijvoorbeeld zie Figuur 11). Terugwinning is mogelijk als de componenten die deze materialen bevatten separaat worden afgescheiden uit het product en naar de hiervoor juiste eindverwerkingstechnologie gaan.

Voor de terugwinning van de kritische stoffen aanwezig op de printplaten wordt verwezen naar bovenstaande discussie voor verwerking van GWG en Printplaten.

## 2.5 Kritische stoffen in Mobiele telefoons

Een mobiele telefoon kan meer dan 40 elementen uit het periodiek systeem bevatten, waaronder 'base' metalen zoals koper (Cu) en tin (Sn), speciale/kritische metalen zoals kobalt (Co), Indium (In) en antimoon (Sb), en PMs en PGMs waaronder zilver (Ag), goud (Au) en palladium (Pd), Wolfraam, Yttrium, etc (zie Figuur 13) [9].



Figuur 13: Materialen in een mobiele telefoon [34]

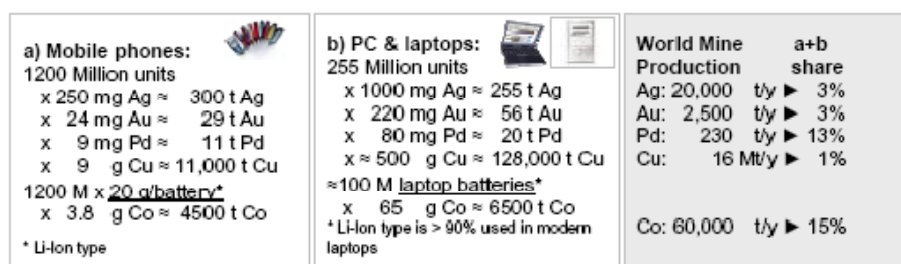
Beschikbare literatuurdata geeft echter geen kwantitatieve analyses voor al deze materialen/elementen. De inschatting voor de hoeveelheid kritische stoffen in mobiele telefoons is uitgevoerd op basis van beschikbare data en toont alleen gegevens voor de PGMs en PMs en Cobalt (in de batterij) (zie Tabel 12).

**Tabel 12 : Berekende hoeveelheden kritische stoffen per mobiele telefoon**

Gegevens mobiele telefoon (literatuurdata en berekende hoeveelheden)		
Gewicht mobiele telefoon	84 – 197	gram
Hoeveelheid Ag per telefoon	66 – 481	mg
Hoeveelheid Au per telefoon	7 – 158	mg
Hoeveelheid Pd per telefoon	5 – 120	mg
Hoeveelheid Pt per telefoon	0.1 – 7.1	mg

### 2.5.1 Kwantificering kritische stoffen in (afgedankte) mobiele telefoons

Met inzamelgegevens van ICT~Milieu kunnen tevens totaal hoeveelheden kritische stoffen voor 2010 worden berekend (gegevens zijn nog niet beschikbaar, Tabel I - 4 geeft een inschatting [18]). Figuur 14 toont de hoeveelheid kritische stoffen in mobiele telefoons en PCs en laptops in verhouding tot de wereldproductie van de verschillende metalen [9].



**Figuur 14: Voorbeeld samenstelling telefoons en PC's en laptops en de impact op 'metal demand' gebaseerd op verkoop in 2007 [34]**

### 2.5.2 Terugwinning/verliezen kritische grondstoffen in recycling van mobiele telefoons

Zie 2.3.2.

## 2.6 Kritische stoffen in Batterijen (accu's)

### 2.6.1 Zn/alkaline batterijen

Voor Zn-batterijen wordt voor de EU de volgende verdeling voor Zn en Zn-alkaline gegeven ([35] en [36]): 39% Zn en 51% alkaline. Getallen voor toepassing van aantallen batterijen liggen op ([35] en [36]):

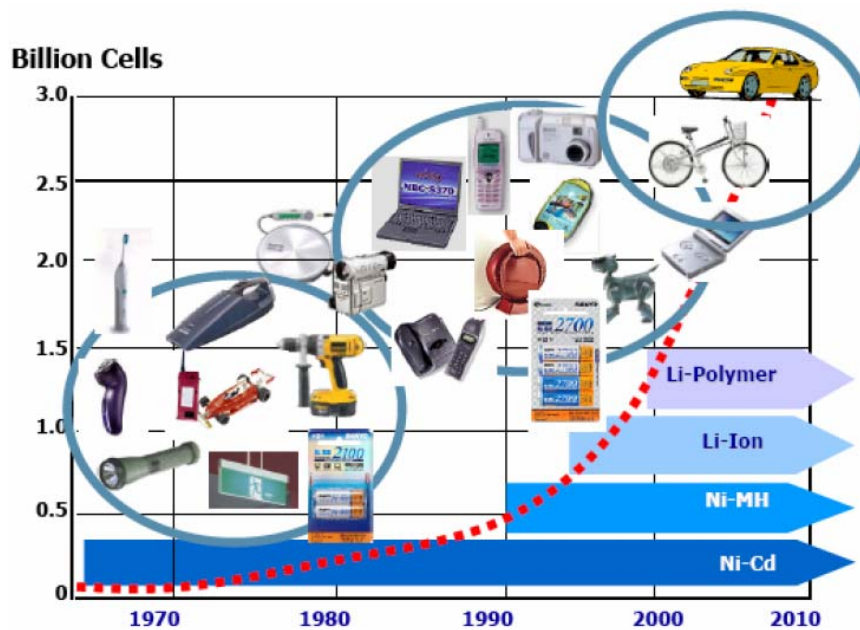
- 8 Miljard batterijen/jaar USA en EU = 160,000 t/jaar (@20g per batterij)
- 6 Miljard batterijen /jaar Japan = 120,000 t/jaar
- 1 Miljard batterijen /jaar Brazilië = 20,000 t/jaar

De samenstelling van deze batterijen is gemiddeld 5-30% Fe / 15-30% Zn / 10-25% Mn. De verwerking van deze batterijen kan worden uitgevoerd in bijv. pyrometallurgische processen door

Valdi & Inmetco technologie. Hierin worden ZnO en FeMn legeringen/producten geproduceerd door het gebruik van de aanwezige koolstof in de batterij als reductiemiddel met toepassing van de slak in de bouwsector (zie referenties [35] tot [41] voor een overzicht over de recycling van batterijen).

## 2.6.2 Oplaadbare batterijen

Vanwege de aanwezigheid van kritische grondstoffen zijn de oplaadbare batterijen van belang (zie Figuur 15). Daarnaast geeft Figuur 14 een overzicht van de gebruikte batterijen en corresponderende metalen/kritische stoffen in mobiele telefoons, PCs en laptops.



Figuur 15: Overzicht in het gebruik van oplaadbare batterijen in verschillende applicaties [41]

### NiCd batterijen

Voor NiCd batterijen geldt een samenstelling van 40-45% Fe / 18-22% Ni / Cd 16-18%. De verwerking/recycling kan bijv. pyrometallurgisch worden uitgevoerd om Cd / CdO (gedistilleerd/vliegash) en een Fe/Ni legering/product en tevens een slak te produceren voor de bouwsector.

### NiMH batterijen

Figuur 16 geeft een overzicht van de opbouw van verschillende typen NiMH batterijen, de samenstelling hiervan inclusief de hoeveelheid REs in deze batterijen. Tevens is een vergelijking getoond tussen de samenstelling van deze batterijen en de verschillende RE-houdende concentraten.

Umicore en Rhodia hebben zeer recentelijk een proces ontwikkeld voor de terugwinning van REs uit NiMH batterijen [42].

Verdere samenstellingsgegevens voor verschillende NiMH batterijen zijn gegeven in Appendix G (Figuur G - 3).

## Li-ion batterijen

Tabel 13 geeft een typische analyse van Li-Ion batterijen. De recycling van Li-Ion batterijen is geïllustreerd in Figuur 17 [41].

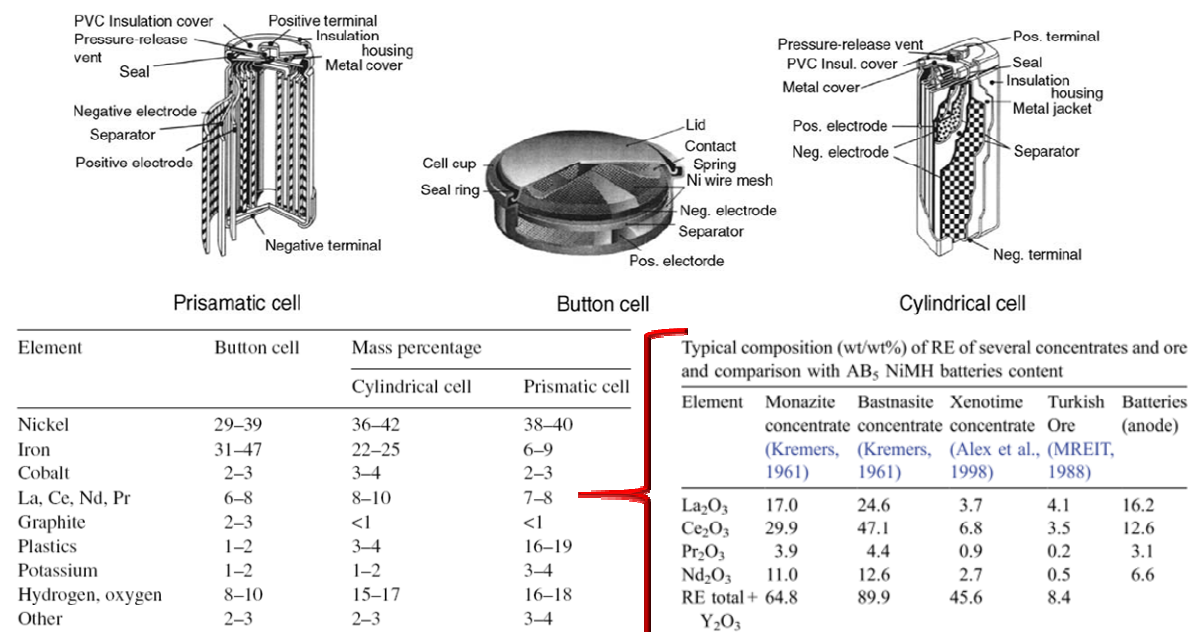
**Tabel 13: Typische samenstelling van Li-Ion batterijen.**

Chemical composition of a typical lithium-ion secondary rechargeable battery

Component	wt. %
LiCoO <sub>2</sub>	27.5
Steel/Ni	24.5
Cu/Al	14.5
Carbon	16
Electrolyte	3.5
Polymer	14

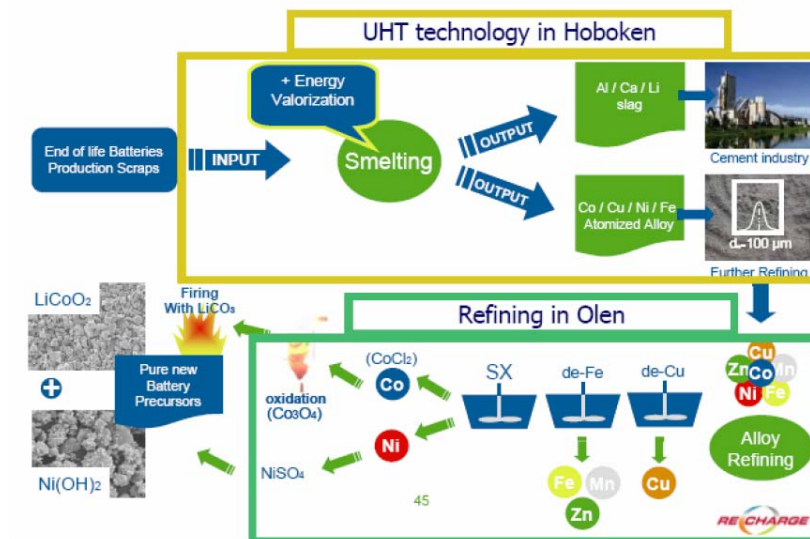
Journal of Power Sources 177 (2008) 512–527

T. Müller, B. Friedrich / Journal of Power Sources 158 (2006) 1498–1509



**Figuur 16: Opbouw en samenstelling van NiMH Batterijen, tevens vergeleken met typerende concentratie van RE in diverse RE-houdende concentraten**

## Overview of the complete process



Figuur 17: Een overzicht over de verwerking van Li-Ion Batterijen [41]

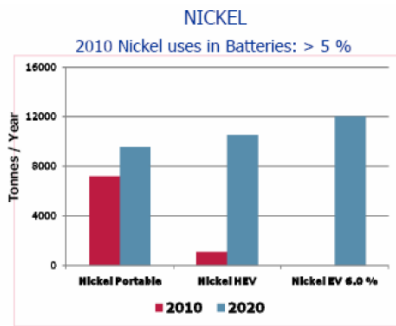
### 2.6.3 Kwantificering kritische stoffen in (afgedankte) batterijen

Figuur 18 toont het gebruik van Ni, REs, Co en Li in batterijen in diverse toepassingen in de EU en het gebruik van de metalen in deze producten relatief tot de totale productie. Vanuit deze figuren is duidelijk dat Nikkel, REs, Cobalt en Lithium belangrijke metalen zijn voor de toekomst.

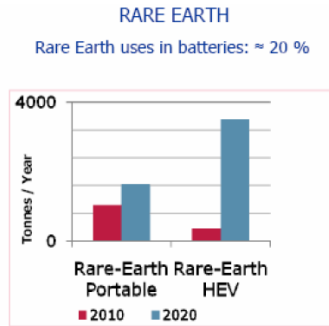
Vanuit Wecycle is op dit moment data beschikbaar over de hoeveelheid batterijen vrijkomend bij de verwerking van OWEB : 0.0654 % NiCd (dry), 0.0336% alkaline, 0.0118% NiMH, 0.0056 % Li-ion en 0.123% loodbatterijen (dry) (alles in % totaal input verwerking van OWEB). Met een totaal ingezameld gewicht van OWEB van 26456 ton in 2010 zou dit voor REs in NiMH batterijen in OWEB grofweg op 250 kg REs/jaar kunnen komen, indien de afdankingsgegevens van batterijen in OWEB over geheel 2010 geprojecteerd kunnen worden. Deze getallen zijn echter zeer indicatief. Om de hoeveelheid vrijkomende kritische stoffen in afgedankte batterijen in E-waste Nederland te berekenen zijn gegevens nodig over het gebruik van de verschillende typen batterijen in de diverse EEE toepassingen, om zodoende een goede koppeling te kunnen maken tussen ingezamelde en verwerkte producten en de hoeveelheden kritische stoffen hierin.

Voor het verkrijgen van een totaalbeeld van de hoeveelheid kritische stoffen gebruikt en vrijkomend in Nederland uit batterijen zou tevens naar de hoeveelheid auto's en samenstellingspopulatie van de afgedankte auto's (elektrische auto versus conventioneel) gekeken moeten worden. Dit kan op dit moment echter nog een vertekend beeld geven. Er wordt hier dan ook alleen de geprojecteerde data gegeven. Feit blijft dat REs een grote rol zullen (gaan) spelen in de toekomst en dat recycling structuren hiervoor opgezet moeten worden binnen Europa, om de beschikbaarheid van deze grondstoffen te kunnen garanderen binnen de EU.

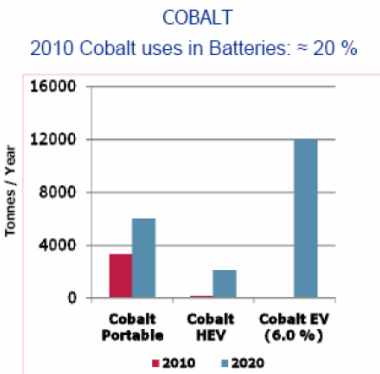




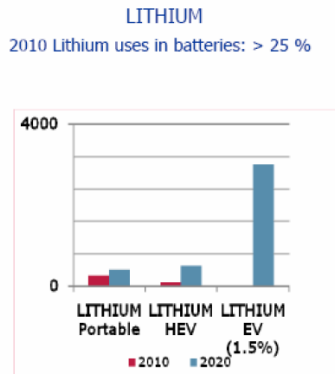
From 100,000 to 1.0 million HEV & 1.0 million Full EV



From 100,000 to 1.0 million HEV



From 100,000 to 1.0 million HEV and & 1.0 million Full EV



Figuur 18 : Het gebruik van Ni, REs, Co en Li in batterijen in de EU en het gebruik van de metalen in deze producten relatief tot totale productie (HEV: Hybrid Electric Vehicle; EV: Full Electric Vehicle) [41]

## Discussie

Dit rapport kwantificeert het voorkomen van een groot aantal kritische stoffen in een selectie van E-waste producten (op basis van databeschikbaarheid) en bespreekt de mogelijkheden en beperkingen van terugwinning hiervan. Dit wordt bepaald door de gevolgde verwerkingsroute (demontage, shredderen en sortering en de gekozen eindverwerkingstechnologie). Bovendien zijn in producten materialen bij elkaar gebracht die van nature (technisch gezien) niet altijd, of slechts ten dele van elkaar kunnen worden afgescheiden in metallurgische eindverwerkingsprocessen; de mate van terugwinbaarheid en materiaalverliezen kan (per product) verschillen als gevolg hiervan.

Om een volledig gekwantificeerd beeld te krijgen van het voorkomen van alle als ‘kritisch’ geïdentificeerde stoffen in E-waste zal het onderzoek zoals nu uitgevoerd voor een aantal producten, eveneens voor de andere E-waste producten dienen te worden uitgevoerd.

Voor het vaststellen van de kwantitatieve rol van de recycling van E-waste in de terugwinning van grondstoffen en kritische materialen (zoals onder andere wordt beoogd met het concept van de Grondstoffenrotonde en als één van de pijlers in het bereiken van Resource Efficiency binnen Europa) is het noodzakelijk dat meer en goede productgegevens (incl. consistente analyses van aanwezige kritische grondstoffen/elementen) beschikbaar zijn en/of worden uitgevoerd. Voor de huidige beschikbare data geldt dat deze vaak op een verschillende basis, voor een niet altijd consistente lijst aan materialen/stoffen/chemische componenten beschikbaar/verkregen is. Verschillende analyses en literatuurbronnen zijn hierdoor niet altijd (goed) met elkaar te combineren en/of te vergelijken.

Het voorbeeld van het aandeel kritische stoffen uit het E-waste (REOs uit Verlichting) vrijgekomen in Nederland versus Europa (en/of wereldproductie) kan ook voor de andere producten en kritische materialen worden uitgewerkt, om zo een kwantitatief beeld van de bijdrage/rol van E-waste recycling in Nederland aan de totale Europese en/of wereldmarkt van vrijgekomen/geproduceerde kritische stoffen te verkrijgen.

In een eerder document [43] is aangegeven wat de voorwaarden en uitdagingen zijn voor het daadwerkelijk kunnen laten slagen van de Grondstoffenrotonde en een Resource Efficient Europe.

## Referenties

- [1] COM (2011) 25 definitief. Mededeling van de commissie aan het Europees parlement, de raad, het Europees economisch en sociaal comité en het comité van de regio's. Grondstoffen en grondstoffenmarkten: Uitdagingen en oplossingen. Brussels, 2011.
- [2] Critical raw materials for the EU (2010): Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, Enterprise and Industry Directorate General, 85p. ([http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/documents/index_en.htm))
- [3] COM (2008) 699. Communication from the commission to the European Parliament and the Council . The raw Materials Initiative – Meeting our critical needs for growth and jobs in Europe, Brussels, 2008.
- [4] BGR, Raw Materials Groep, 2010.
- [5] M.A. Reuter, K. Heiskanen, U. Boin, A. van Schaik, E. Verhoef and Y. Yang (2005): The Metrics of Material and Metal Ecology, Harmonizing the resource, technology and environmental cycles Elsevier BV, Amsterdam, 706p. (ISBN: 13 978-0-444-51137-9, ISBN: 10: 0-444-51137-7, ISSN: 0167-4528).
- [6] U.S. Geological Survey (USGS) (2002). Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology, USGS Fact Sheet 087-02.
- [7] U.S. Geological Survey (USGS) (2010). The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States— A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective Scientific Investigations Report 2010–5220 U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, 104 p.
- [8] Lynas Corporation Ltd (2011). Rare Earths – We touch them every day. Investor presentation, May 2011 ([http://www.lynascorp.com/content/upload/files/Presentations/Investor\\_Presentation\\_May\\_2011.pdf](http://www.lynascorp.com/content/upload/files/Presentations/Investor_Presentation_May_2011.pdf))
- [9] UNEP StEP Report (2009). Recycling – From E-waste to Resources. Berlin, Germany, p. 120. (www.unep.org and www.step-initiative.org)
- [10] F.O. Ongondo, I.D. Williams and T.J. Cherret (2011). How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. Waste Management 31, 714-730.
- [11] A. van Schaik and M.A. Reuter (2004): The time-varying factors influencing the recycling rate of products. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 40(4), pp. 301-328.
- [12] United Nations University (2007). 2008 Review of Directive 2002/96 on Waste. Electrical and Electronic Equipment – Study No. 07010401/2006/442493/ETU/G4. 347p.
- [13] A. van Schaik and M.A. Reuter (2010): Dynamic modelling of E-waste recycling system performance based on product design. Minerals Engineering, Vol. 23, pp. 192-210.
- [14] M.A. Reuter, A. van Schaik and O. Ignatenko (2006): Fundamental limits for the recycling of end-of-life vehicles. Minerals Engineering, Vol. 19(5), pp. 433-449.
- [15] W.J. van den Hoek, G.M.J.F. Luuks, C.G.H. Hoelen (2010): Lamps. Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 53p.
- [16] K. A. Franz, W. G. Kehr, A. Siggel, J. Wiczoreck, W. Adam (2010). Luminescent Materials. Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 41p.
- [17] I. McGill (2010). Rare Earth Elements. Ullmann's Encyclopaedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 46p.
- [18] Wecycle, Nederland (2011).
- [19] Chemconserve, Nederland (2011).
- [20] ELC (European Lamp Companies Federation) (2009). Environmental aspects of lamps. Brussels, 2<sup>nd</sup> edition, April 2009. 17 p.
- [21] M.A. Rabah (2004): Recovery of aluminium, nickel–copper alloys and salts from spent fluorescent lamps. Waste Management, Vol. 24, pp. 119-126.
- [22] Indaver (2011). [www.indaver.be](http://www.indaver.be)
- [23] Alba GmbH, Germany (2011).
- [24] U.S. Geological Survey (2010), Mineral commodity Summaries, Yttrium.
- [25] Jüstel, T. (2007). Fluorescent lamp phosphors. Is there still News? PGS, Seoul.

- [26] Lynas Corporation Ltd. (2010) Rare Earths. J.P. Morgan. Australia Corporate Access Days. New York 27-28 September 2010.
- [27] U.S. Department of Energy (2010): Critical Materials Strategy.
- [28] Goosey, M. and Kellner, R. A scoping study. End of life printed circuit boards. Supported by Department of Trade and Industry Intellect Shipley Europe Limited.
- [29] European Commission DG Environment (2006). Gather, process, and summarise information for the review of the waste electric and electronic equipment directive (2002/96/EC). Synthesis report. Final version September 21, 2006. [ENV.G.1/FRA/2004/0081, study no. 16]. 293 p.
- [30] C. Hagelücken (2006). Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling. In: Proceedings of the 2006 IEEE Int. Symposium on Electronics and the Environment. IEEE. 218-223.
- [31] Chancerel, P., Meskers, C.E.M., Hagelücken, C., and Rotter, V.S. (2009). Precious metal flows during the preprocessing of electronic waste. *Journal of Industrial Ecology* 13 (5). 791-810.
- [32] NewBoliden (2011).
- [33] J. Huisman (2004). Qwerty and Eco-Efficiency analysis on treatment of CRT containing appliances at Metallo-Chimique NV. The eco-efficiency of treating CRT glass fractions versus stripped appliances in a secondary copper-tin-lead smelter. 36 p.
- [34] Umicore, Belgium (2008).
- [35] A.M. Bernardes et al. (2004): Recycling of batteries: a review of current processes and technologies, *Journal of Power Sources*, Vol. 130, pp. 291–298.
- [36] J. Xu et al. (2008): A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries, *Journal of Power Sources*, Vol. 177, pp. 512–527.
- [37] E. Rombach et al. (2008): Altbatterien als sekundäre Rohstoffressource für die Metallgewinnung, *World of Metallurgy – Erzmetall*, Vol. 61(3), pp. 180-185.
- [38] T. Müller, B. Friedrich (2006): Development of a recycling process for nickel-metal hydride batteries, *Journal of Power Sources*, Vol. 158, pp.1498–1509.
- [39] L. Pietrelli et al. (2002): Rare earths recovery from NiMH spent batteries, *Hydrometallurgy*, Vol. 66, pp.135-139.
- [40] D.A. Bertuol et al. (2006): Spent NiMH batteries: Characterization and metal recovery through mechanical processing, *Journal of Power Sources*, Vol. 160, pp. 1465–1470.
- [41] EUROMETAUX'S PROPOSALS FOR THE RAW MATERIALS INITIATIVE, Darmstadt / Brussels, 11<sup>th</sup> June 2010 (<http://www.oeko.de/oekodoc/1069/2010-115-en.pdf>).
- [42] Umicore/Rhodia (2011). Press release. CP-2011-18-R Umicore and Rhodia develop unique rare earth recycling process for rechargeable batteries. 16 juni 2011.
- [43] A. van Schaik (2011). Grondstoffenrotonde en een 'Resource Efficient Europe'. Notitie in opdracht van de Vereniging NVMP. 31 maart 2011. 10 p.
- [44] T. Matsuto, C.H. Jung, N. Tanaka. (2004). Material and heavy metal balance in a recycling facility for home electrical appliances. *Waste Management* 24, 425-436.
- [45] N. Truttmann and H. Rechberger (2006). Contribution to resource conservation by reuse of electrical and electronic household appliances *Resources, Conservation and Recycling* 48, 249-262.
- [46] DEFRA (2007). Trial to establish waste electrical and electronic equipment (WEEE) protocols. 104 p.
- [47] M.A. Rabah (2008): Recyclables recovery of europium and yttrium metals and some salts from spent fluorescent lamps, *Waste Management*, Vol. 28, pp. 318-325.
- [48] T. Welz, Hischer, R. and Hilty, L.M. (2011). Environmental impacts of lighting technologies – Life cycle assessment and sensitivity analysis. *Environmental Impact Assessment Review* 31, 334-343
- [49] D. Schüler et al. (2011). Study on Rare Earths and Their Recycling Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament. Öko-institut e.V. Darmstadt, Germany, 140 p.
- [50] P. Chancerel and S. Rotter (2009). Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment. *Waste Management* 29, 2336–2352.
- [51] Witteveen en Bos (2009). Bepaling van gewichten van huishoudelijke elektrische apparaten in de afvalfase. 20 p.
- [52] G. Dodbiba, K. Takahashi, J. Sadaki, T. Fujita (2006). The recycling of plastic wastes from discarded TV sets: comparing energy recovery with mechanical recycling in the context of life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 16, 458 – 470.

## Appendix A

Tabel A - 1: Rare Earth Reserves [7]

Land	Rare Earth Reserves (Mio t REO)
<b>China</b>	<b>36</b>
Verenigde Staten	13
Australië	5.4
CIS (voormalige Sovjet Unie)	19
India	3.1
Brazilië	0.65
Malaysia	0.38
Overige landen (Canada, Groenland, Zuid Afrika, Malawi, Vietnam)	22
<b>Totaal buiten China</b>	<b>64</b>
<b>Wereldtotaal</b>	<b>99</b>

Tabel A - 2: Wereld mijn- en recyclingproductie van rare earths in 2010 [7] en [8]

Land	Tonnen rare earth oxide (REO)	Opmerkingen
China	103300	Inclusief recycling (3300 ton)
India	3000	
Rusland	4000	Beperkte uitbreidingscapaciteit
USA	3000	Herverwerking 'stockpiles'
Recycling	1500	Magneten (afval) en batterijen
<b>Totaal</b>	<b>114800</b>	

Tabel A - 3: Toepassing REO 2010 en voorspelling 2014 [8]

Toepassing zeldzame aarden 2010 en voorspelling 2014					
	2010		2014		
	Vraag [%]	Ton	Groei	Vraag[%]	Ton
Magneten	25%	31500	12%	28%	49600
Batterijen	15%	18600	15%	18%	320
Metallurgie excl batterijen	9%	11700	2%	7%	12700
Autocatalysatoren	7%	9000	8%	7%	12200
FCC	17%	21300	4%	14%	24900
Polijstpoeders	11%	14000	10%	12%	20600
Glasadditieven	6%	7800	0%	4%	7800
Fosforpoeders	6%	7900	8%	6%	10800
Overig	4%	5700	8%	3%	6100
<b>Totaal*</b>		<b>127500</b>			<b>177200</b>

\*Totaal kunnen afwijking door afronding

Tabel A - 4: Productie en vraag afzonderlijke REO in tonnen (2014) [8]

2014 aanbod/productie versus vraag (REO) (in tonnen)			Onbalans vraag/aanbod REO
REO	Vraag	Aanbod/productie	Balans (tekort - /overschot +)
Lanthanum	53,800	40,000	- 13,800
Cerium	52,800	66,300	+13,500
Praseodymium	14,400	8,300	-6,100
Neodymium	40,900	27,900	-13,000
Samarium	1,100	2,900	-1,800
Europium	540	375	-165
Gadolinium	1,200	1,700	+500
Terbium	600	250	-350
Dysprosium	2,500	1,100	-1,400
Yttrium	9,300	6,000	-3,300
<b>Totaal</b>	<b>177,200</b>	<b>156,200</b>	<b>-21,000</b>

Tabel A - 5: Gebruikte REs in diverse toepassingen (%) [7]

Toepassing	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Overig
Magneten	-	-	23.4	69.4	-	-	2	0.2	5	-	-
Batterijen	50	33.4	3.3	10	3.3	-	-	-	-	-	-
Metallurgie(legeringen)	26	52	5.5	16.5	-	-	-	-	-	-	-
Autocatalysatoren	5	90	2	3	-	-	-	-	-	-	-
Petroleum industrie	90	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Polijspoeders	31.5	65	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Glasadditieven	24	66	1	3	-	-	-	-	-	2	4
Fosforpoeders	8.5	11	-	-	-	4.9	1.8	4.6	-	69.2	-
Keramische materialen	17	12	6	12	-	-	-	-	-	53	-
Overig	19	39	4	15	2	-	1	-	-	19	-

Tabel A - 6: Globale vraag naar kritische grondstoffen vanuit 'emerging technologies' geanalyseerd voor grondstoffen in 2006 en 2030 [2]

Raw material	Production 2006 <sup>1)</sup> (t)	ETRD 2006 (t)	ETRD 2030 (t)	Indicator 2006	Indicator 2030
Gallium	152 <sup>6)</sup>	28	603	0,18 <sup>1)</sup>	3,97 <sup>1)</sup>
Indium	581	234	1.911	0,40 <sup>1)</sup>	3,29 <sup>1)</sup>
Germanium	100	28	220	0,28 <sup>1)</sup>	2,20 <sup>1)</sup>
Neodymium <sup>7)</sup>	16.800	4.000	27.900	0,23 <sup>1)</sup>	1,66 <sup>1)</sup>
Platinum <sup>8)</sup>	255	very small	345	0	1,35 <sup>1)</sup>
Tantalum	1.384	551	1.410	0,40 <sup>1)</sup>	1,02 <sup>1)</sup>
Silver	19.051	5.342	15.823	0,28 <sup>1)</sup>	0,83 <sup>1)</sup>
Cobalt	62.279	12.820	26.860	0,21 <sup>1)</sup>	0,43 <sup>1)</sup>
Palladium <sup>8)</sup>	267	23	77	0,09 <sup>1)</sup>	0,29 <sup>1)</sup>
Titanium	7.211.000 <sup>3)</sup>	15.397	58.148	0,08	0,29
Copper	15.093.000	1.410.000	3.696.070	0,09	0,24
Ruthenium <sup>8)</sup>	29 <sup>4)</sup>	0	1	0	0,03
Niobium	44.531	288	1.410	0,01	0,03
Antimony	172.223	28	71	<0,01	<0,01
Chromium	19.825.713 <sup>3)</sup>	11.250	41.900	<0,01	<0,01

ETRD = Emerging Technologies Raw Material Demand

<sup>1)</sup> Data updated by the BGR based on new information <sup>2)</sup> Chromite <sup>3)</sup> Ore concentrate <sup>4)</sup> Consumption  
<sup>6)</sup> Estimation of full production in China and Russia <sup>7)</sup> rare earth <sup>8)</sup> platinum group metals

**Tabel A - 7: Potentiële kritische grondstoffen: wereldwijde productie, reserves en hoeveelheden in EEE [10]**

Symbol	Silver Ag	Gold Au	Bismuth Bi	Cobalt Co	Copper Cu	Palladium Pd	Antimony Sb	Tin Sn
World mine production (t/a)	20,000	2500	5600	58,000	15 × 10 <sup>6</sup>	230	130,000	275,000
Demand for EEE (t/a)	6000	300	900	11,000	4.5 × 10 <sup>6</sup>	33	65,000	90,000
Demand as% of production	30	12	16	19	30	14	50	33
World reserves <sup>a</sup> ('000 t)	400	47	320	6600	540,000	-	2100	5600
WEEE categories and sub-categories Amount in EEE by weight (g)								
1A, 10	0.008	0.0019	-	-	1736	0.001	0.045	25.5
1B	-	-	-	-	958	-	-	-
1C	0.0023	0.00068	-	0.23	956	0.0014	0.029	-
2, 5A, 8	0.00033	0.0001	-	0.18	484	0.0002	0.0041	-
3A	0.48	0.079	0.048	0.27	159	0.03	0.19	-
4A	0.12	0.016	0.06	0.14	423	0.0029	0.24	-
6	0.001	0.00028	-	1.29	1075	0.00058	0.012	-
7	0.072	0.008	-	0.29	25.58	0.00059	-	-
3B	0.21	0.013	0.95	0.18	723	0.0048	3.02	0.81
4B	2.65	0.17	0.66	0.21	971	0.067	5.75	13
3C	0.52	0.2	-	-	310	0.041	0.16	0.53
4C	0.45	0.11	-	-	824	0.034	0.71	18.3
5B	0.00027	0.000025	-	-	2.76	0.000015	0.00074	0.11

t/a: tonnes per annum; 1A: large domestic appliances excluding cooling and freezing equipment and "smaller" LDA items (e.g., cookers, washing machines); 1B: cooling and freezing appliances (e.g., refrigerators, air conditioning units); 1C: "Smaller items within the large domestic appliances (e.g., microwaves); 2: Small domestic appliances (e.g., toasters, vacuum cleaners); 3A: IT and Telecom excluding CRTs (e.g., computers, telephones); 3B: CRT Monitors; 3C: LCD Monitors; 4A: Consumer electronics excluding CRTs (e.g., DVD players, audio amplifiers); 4B: CRT TVs; 4C: flat panel TVs; 5A: lighting equipment - luminaries; 5B: lighting equipment - lamps; 6: electrical and electronic tools (e.g., drills, lawn mowers); 7: toys, leisure and sports equipment (e.g., game consoles); 8: small domestic medical devices; 9: monitoring and control instruments (e.g., smoke detectors, thermostats) - there was no data for this category; 10: automatic dispensers.

<sup>a</sup> That part of the reserve base which could be economically extracted or produced at the time of determination; - indicates missing data or not applicable.

**Tabel A - 8: Metalen toegepast in elektrische apparaten (gebaseerd op demand 2006) [9]**

Metal	Primary production*	By-product from	Demand for EEE	Demand/production	Price**	Value in EEE**	Main applications
	t/y		t/y	%	USD/kg	10 <sup>6</sup> USD	
Ag	20 000	(Pb, Zn)	6 000	30	430	2.6	Contacts, switches, solders...
Au	2 500	(Cu)	300	12	22 280	6.7	Bonding wire, contacts, integrated circuits...
Pd	230	PGM	33	14	11 413	0.4	Multilayer capacitors, connectors
Pt	210	PGM	13	6	41 957	0.5	Hard disk, thermocouple, fuel cell
Ru	32	PGM	27	84	18 647	0.5	Hard disk, plasma displays
Cu	15 000 000		4 500 000	30	7	32.1	Cable, wire, connector...
Sn	275 000		90 000	33	15	1.3	Solders
Sb	130 000		65 000	50	6	0.4	Flame retardant, CRT glass
Co	58 000	(Ni, Cu)	11 000	19	62	0.7	Rechargeable batteries
Bi	5 600	Pb, W, Zn	900	16	31	0.03	Solders, capacitor, heat sink...
Se	1 400	Cu	240	17	72	0.02	Electro-optic, copier, solar cell
In	480	Zn, Pb	380	79	682	0.3	LCD glass, solder, semiconductor
<b>Total</b>			<b>4 670 000</b>			<b>45.4</b>	

## Appendix B

Tabel B - 1: Gemiddelde samenstelling (naar 'commodity materials') van diverse Groot Witgoed apparaten [18]

Materiaal [%]	Wasmachine	Wasdroger	Vaatmachine	Oven/fornuis
IJzer/staal	52.1	68.8	45.2	81.3
Koper	1.2	2.3	1.5	0.2
Aluminium	3.1	2.1	0.8	1.9
RVS	1.9	1.2	23.2	0.7
Messing	0.1	0.1	0.2	0.5
Kunststof	6.8	15.9	12.6	0.7
Rubber	2.8	0.9	1.6	0.4
Hout	2.6	4.5	2.1	0.0
Overig organisch materiaal	0.1	-	5.3	0.0
Beton	23.8	-	1.9	0.0
Overig inert materiaal	1.9	1.3	0.9	12.6
Printplaat (laagwaardig)	0.4	0.4	0.1	0.1
Kabels (intern/extern)	1.1	1.8	1.5	1.3
Overige materialen	2.2	0.8	3.2	0.3
<b>Totaal</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100.0</b>

Tabel B - 2: Variatie in samenstelling (en hieraan gerelateerd voorkomen van kritische stoffen) van de wasmachine en GWG gebaseerd op diverse literatuurbronnen

Materiaal [%]	Wasmachine			GWG		
	[18]	[44]	[45]	[18]	[46]	[12]
IJzer/staal	52.1	50.6	50.7	54.9	54.3	54.2
Koper	1.2	1.4	2.4	1.4	5.6	2.2
Aluminium	3.1	0.8	2.6	2.5		1.7
RVS	1.9	-		5.4		1.7
Messing	0.1	0.0		0.1		-
Kunststof	6.8	40.5	8.9	9.3	12.4	12.4
Rubber	2.8	0.3	2.1	2.2	2.9	2.8
Hout	2.6	-	3.3	2.8	1.8	1.8
Overig organisch materiaal	0.1	-	-	1.0	0.3	0.0
Beton	23.8	-	28.8	14.8	7.5	20.2
Overig inert materiaal	1.9	-	1.3	1.9	0.7	0.7
Printplaat (laagwaardig)	0.4	0.4	-	0.3	0.1	0.001
Kabels (intern/extern)	1.1	2.0	-	1.3	1.8	1.8
Overige materialen	2.1	4.0	-	2.0	12.7	0.5
<b>Totaal</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>



## Appendix C

Tabel C - 1: Materiaalsamenstelling lampen op basis van diverse literatuurbronnen (%)

Materiaal [%]	[12]	[21]	[47]			[20]									
	Mix of lamps	Fluorescent lamps	Fluorescent lamp 120 cm	Fluorescent lamp 60 cm	Circular 30 cm	GLS 60W	Halogeen 35W	Halogeen integraal 36W	Fluorescent 36W	CFL-integraal 11W	CFL-niet-integraal 13W	HID		LED retrofit 7W	
Voorbeeld type lamp			120 cm	60 cm	30 cm	60W	35W	36W	36W	11W	13W	MHL 400W	HPS 150W	7W	
IJzer/staal	1.6					13	20.0	12.7	2.5	3.3	5.5	17.5	29.7	40.3	
Koper	1.8														
Aluminium	5.6	0.9	1.4	2.6	2.1										
RVS	0.0														
Messing			0.2	0.3	0.3										
Kunststof	1.7					-	-	35.3	-	20.8	18.2	-	-	23.4	
Rubber															
Hg	0.0 <sup>a</sup>		0.0	0.0	0.0										
Fluorescerend poeder	1.6	0.3	2.3	2.2	2.9										
Glas	85.9	97.6	95.0	93.2	93.2	78.3	79.8	25.3	95.8	54.2	72.7	81.3	70.0	12.1	
Keramisch materiaal	0.4														
Printplaat (laagwaardig)	0.9					-	-	24.1	-	20.8	-	-	-	21.8	
Ni/Cu draad		1.1	0.1	0.2	0.2										
Wolfram		0.1	0.4	0.8	0.7										
Overige materialen	0.5	0.1	0.6	0.8	0.7	8.7	0.2	2.5	1.7	0.8	3.6	1.3	0.3	2.4	
<b>Totaal</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	
Rest = lamp omhulsel en materialen zoals elektrodes, pasta en keramische delen GLS= General Lighting Source; CFL-integral = Compact Fluorescent Lamp; HID= High Density Discharge Lamp															

<sup>a</sup> 45 ppm Hg voor 2006, schatting 2011 22 ppm Hg

Tabel C - 2: Gewicht verschillende typen verlichting op basis van verschillende bronnen

Lamp type	Specificatie	Gewicht [gram]	Referentie
Mix of lamps (2006)	TL, TL luxurious, CFL, HID	144	[12]
Mix of lamps (estimation 2011)	TL, TL luxurious, CFL, HID	134	[12]
Fluorescerende lamp	120 cm	192	[41]
Fluorescerende lamp	60 cm	101	[41]
Circular	30 cm	117	[41]
GLS	60W	23	[41]
Halogeen	35W	2.5 – 29	[20], [48]
Halogeen integraal	30W	79	[20]
Fluorescerent	36W	120- 226	[20], [48]
CFL-integraal	11W	111 – 120	[20], [48]
CFL-niet-integraal	13W	55	[20]
HID	MHL 400W	240	[20]
	HPS 150W	150	[20]
LED retrofit	7W	124	[20]
Fluorescerende lamp (TL)	< 60 cm	70	[18]
Fluorescerende lamp (TL)	> 60 cm	200	[18]
Spaarlamp retrofit	-	150	[18]
Spaarlamp niet-retrofit	-	70	[18]
Hogedruklamp	-	180	[18]
Natriumlamp	-	450	[18]
LED lamp	-	30	[18]
Overige gasontladinglampen	-	180	[18]

Tabel C - 3: Samenstelling fluorescentiepoeders verlichting (%)

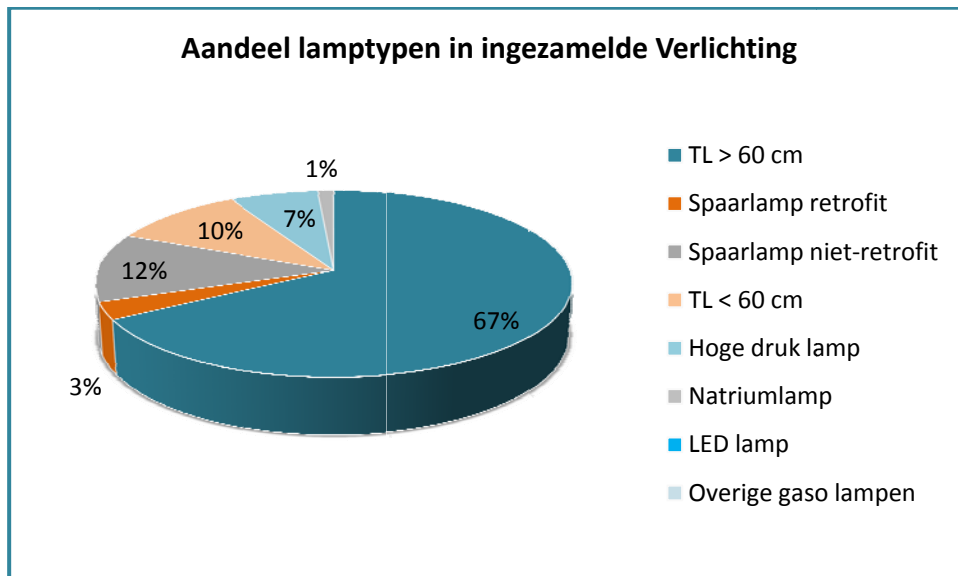
Materiaal [%]	[21]	[47]			
	Fluorescent lamps	Fluorescent lamp 120 cm	Fluorescent lamp 60 cm	Circular 30 cm	Average
Ca sulfaat	34.5	65.5	63.0	62.0	64.4
Ca (ortho)fosfaat	61.5	32.0	34.5	35.5	33.1
Europiumoxide (Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5
Yttriumoxide (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1.7	1.0	1.0	1.0	1.0
Overig (metaalverontreinigingen)	0.7	-	-	-	-
<b>Totaal</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

Tabel C - 4: Aanvullende gegevens chemische samenstelling van de meest gebruikte poeders met de concentratie van de REO [49] \*

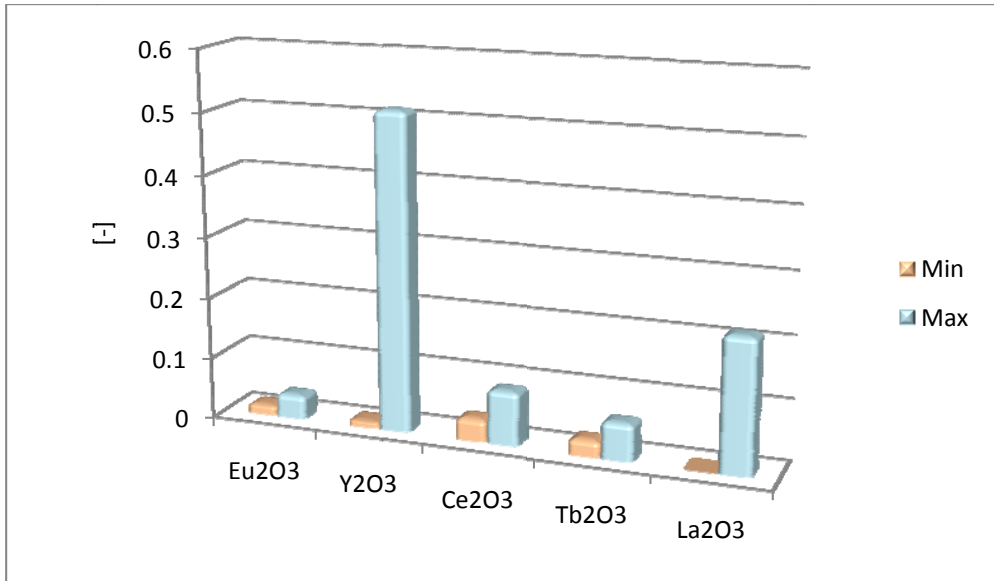
Fosforpoeders zonder REs	Chemische samenstelling
Halophosphate: CaO, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , MnO, Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , F, Cl (wit/blauw)	
Fosforpoeders met REs	
Yttrium europium oxide (YOE)	~95 % Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ~5 % Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (rood)
Barium magnesium aluminate (BAM)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BaO, MgO, ~2 % Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (blauw)
Cerium magnesium aluminate (CAT):	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ~ 11 % Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ~ 8 % Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO (groen)
Lanthanum phosphate (LAP)	~40 % La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ~16 % Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ~ 11 % Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (groen)

*Bovenstaande toont de REs zoals gebruikt als activator, daarnaast wordt in de 'host lattice' tevens yttrium, cerium or lanthanum toegepast.*

\*De gemiddelde bandbreedte van de te verwachten hoeveelheid REOs per lamp is berekend voor diverse samenstellingsmogelijkheden van de poeders zoals gegeven in Tabel C - 3 t/m Tabel C - 5. Hierbij is voor het gebruik van de verschillende driekleurenpoeders de aanname gemaakt dat een gelijke verhouding van de driekleurencomponenten is gebruikt (de exacte verhouding van de kleuren en gebruikte REOs is afhankelijk van producent en gewenste kleurtemperatuur). Voor het gemiddelde gewicht van de REOs per lamp is de samenstelling van de populatie afgedankte lampen van Wecycle in 2010 als uitgangspunt genomen (zie Figuur C - 1). Aangezien REOs alleen voorkomen in fluorescerende lampen, zijn alleen deze meegenomen in de berekeningen (Figuur C - 1 toont de volledige populatie ingezamelde lampen in 2010). Figuur C - 2 toont de mogelijke verhoudingen en gebruik van de verschillende REOs in deze lampen.



Figuur C - 1: Aandeel verschillende typen lampen in ingezamelde Verlichting [18]



Figuur C - 2: Bandbreedte mogelijke verhoudingen van de verschillende REOs in lampen (bandbreedtes en combinatie afhankelijk van mix van gebruikte poeders/kleurtemperatuur, type lamp, etc.)

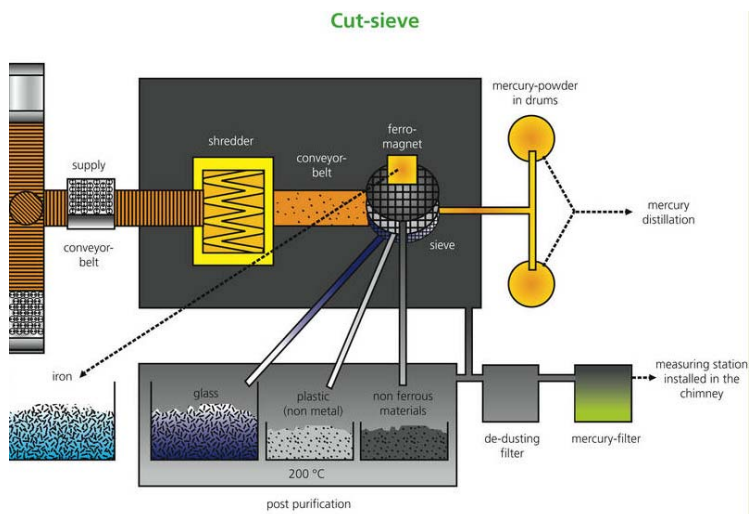
Tabel C - 5: Typerende samenstelling fosforpoeders verlichting [15]

Material	Emission wavelength
<i>General lighting phosphors (Hg discharge)</i>	
Broad band emission	broad emission bands resulting in approx. white light
Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (Cl,F) : Sb <sup>3+</sup> , Mn <sup>2+</sup>	
Narrow band emission	
BaMgAl <sub>10</sub> O <sub>17</sub> : Eu <sup>2+</sup>	450 nm
CeMgAl <sub>11</sub> O <sub>19</sub> : Tb <sup>3+</sup>	542 nm
LaPO <sub>4</sub> : Ce <sup>3+</sup> , Tb <sup>3+</sup>	545 nm
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : Eu <sup>3+</sup>	612 nm
<i>UV-emitting phosphors</i>	
Narrow band emission	330–370 nm
BaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> : Pb <sup>2+</sup>	
YPO <sub>4</sub> : Ce <sup>3+</sup>	
LaPO <sub>4</sub> : Ce <sup>3+</sup>	
CeMgAl <sub>11</sub> O <sub>19</sub>	
<i>General lighting phosphors (LEDs)</i>	
Broad band emission	
(Lu,Y,Gd) <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> :Ce <sup>3+</sup>	520–580 nm (peak wavelength)
(Ca,Sr)AlSiN <sub>3</sub> :Eu <sup>2+</sup>	620–650 nm (peak wavelength)

Tabel C - 6: Samenstellingsgegevens LEDs [15]\*

Material	Peak wavelength, nm	Typical luminous efficacy at 350 mA and 25 °C, lm/W
AlGaInP	580–650	60 at 595 nm (amber) 80 at 625 nm (red-orange) 65 at 635 nm (red)
InGaN	440–540	18 at 450 nm (deep blue) 30 at 470 nm (blue) 70 at 505 nm (cyan) 95 at 530 nm (green)
InGaN + YAG:Ce	450 and 570	100 at 4000 K (neutral white)
InGaN + phosphors	460 and 620	65 at 2700 K (warm white, CRI 80)

\*Tevens worden toepassing van gadolinium, cerium, terbium, europium, yttrium, lanthanum, samarium en lutetium als ‘host lattice’ en activator in LEDs en europium, terbium, samarium, lanthanum, gadolinium, lutetium, thulium and dysprosium voor gebruik in OLEDs genoemd.[49]



Figuur C - 3: A schematic overview of the cutting and physical sorting of lamps [22]

## Appendix D

Tabel D - 1: Samenstelling van een gemiddelde PC (gewicht rond 30 kg) [29]

Materiaal	% (gew.)	Gebruik/locatie
Plastics	22.907	Includes organics, oxides other than silica
Lead	6.2968	Metal joining, radiation shield, CRT, PWB
Aluminium	14.1723	Structural, conductivity housing, CRT, PWB, connectors
Germanium	0.0016	Semiconductor/ PWB
Gallium	0.0013	Semiconductor/ PWB
Iron	20.4712	Structural, magnetivity (steel) housing, CRT , PWB
Tin	1.0078	Metal joining, PWB, CRT, connectors
Copper	6.9287	Conductivity CRT, PWB, connectors
Barium	0.0315	Vacuum tube CRT
Nickel	0.8503	Structural, magnetivity (steel) housing, CRT , PWB
Zinc	2.2046	Battery, phosphor emission PWB, CRT
Tantalum	0.0157	Capacitors/PWB, power supply
Indium	0.0016	Transistor, PWB
Vanadium	0.0002	Red phosphor emittor CRT
Terbium	0	Green phosphor activator, dopant CRT, PWB
Beryllium	0.0157	Thermal conductivity, PWB, connectors
Gold	0.0016	Connectivity, conductivity, PWB, connectors
Europium	0.0002	Phosphor activation PWB
Titanium	0.0157	Pigment, alloying agent (aluminium) housing
Ruthenium	0.0016	Resistive circuits PWB
Cobalt	0.0157	Structural, magnetivity (steel) housing, CRT , PWB
Palladium	0.0003	Connectivity, conductivity, PWB, connectors
Manganese	0.0315	Structural, magnetivity (steel) housing, CRT , PWB
Silver	0.0189	Conductivity PWB, connectors
Antimony	0.0094	Diode housing, PWB, CRT
Bismuth	0.0063	Wetting agent in thick film PWB
Chromium	0.0063	Decorative, hardener (steel) housing
Cadmium	0.0094	Battery, phosphor emission, housing PWB, CRT
Selenium	0.0016	Rectifiers PWB
Niobium	0.0002	Welding alloy/housing
Yttrium	0.0002	Red phosphor emittor CRT
Rhodium	0	Thick film conductor PWB
Platinum	0	Thick film conductor PWB
Mercury	0.0022	Batteries, switches, housing, PWB
Arsenic	0.0013	Doping agent in transistors PWB
Silica	24.8803	Glass, solid devices CRT, PWB

Tabel D - 2: Gemiddelde samenstelling printplaten per 'treatment category' (in fractie, totaal is 1) [12]

Component	1A LHHA	1C LHHA- small	2 SHHA	3A1 IT ex CRT PC's	3A2 IT ex CRT Printing devices	3A3 IT ex CRT Small IT	3B IT CRT	3C IT FDP <sup>®</sup>	4A1 CE ex CRT Large Audio	4A2 CE ex CRT VCRs DVD etc.	4B CE CRT	4C CE FDP	5B Lamps	6 Tools	7.1 Toys Game cons. Power b.	7.2 Toys Game cons. control b.
Fe	9.9E-02	2.1E-01	1.2E-01	1.3E-01	3.9E-01	8.0E-02	1.0E-01	5.2E-03	9.3E-02	5.3E-02	1.1E-02	1.2E-01	1.2E-01	4.1E-02	2.7E-02	8.3E-02
Cu	1.3E-01	1.3E-01	1.1E-01	1.8E-01	1.4E-01	1.0E-01	1.8E-01	4.0E-01	1.9E-01	1.6E-01	1.7E-01	2.2E-01	1.1E-01	1.6E-01	2.0E-01	2.0E-01
Ag	1.6E-04	4.8E-05	2.2E-04	1.0E-03	3.5E-04	5.7E-03	1.5E-04	1.3E-03	5.2E-04	7.0E-04	1.6E-03	2.5E-04	2.2E-04	1.1E-03	4.3E-04	3.0E-04
Au	3.8E-05	1.4E-05	2.0E-05	2.3E-04	4.7E-05	1.3E-03	9.2E-06	4.9E-04	6.8E-05	1.0E-04	1.1E-04	6.0E-05	2.0E-05	1.8E-05	1.6E-04	1.8E-05
Pd	2.0E-05	2.9E-05	1.2E-05	9.0E-05	9.0E-06	4.7E-04	3.4E-06	9.9E-05	8.0E-06	2.1E-05	4.1E-05	1.9E-05	1.2E-05	4.8E-05	1.8E-05	
Al (general)	7.7E-02	7.6E-02	8.6E-02	4.0E-02	4.4E-02	2.0E-02	4.6E-02	1.9E-02	1.3E-01	5.9E-02	6.3E-02	1.5E-01	8.6E-02	5.8E-02	6.1E-02	1.8E-01
As						2.7E-05										
Be						8.8E-05										
Bi						2.0E-04	6.9E-04			6.0E-04	4.0E-04					
Cd						1.4E-06										
Cr	1.0E-04	2.9E-04	2.1E-04	5.5E-04	7.5E-04	2.5E-02	6.9E-04	2.0E-04	0.0E+00	4.0E-04	2.1E-04	3.5E-04	2.1E-04	2.1E-04		
Ni	5.0E-04	9.0E-04	1.1E-03	9.0E-03	1.2E-03	3.5E-02	2.5E-03	9.0E-03	2.8E-03	2.8E-03	3.0E-03	1.8E-03	1.1E-03	1.1E-03	3.5E-03	1.0E-03
Pb	1.5E-02	1.0E-02	3.0E-02	3.3E-03	5.4E-03	1.4E-02	1.1E-02	5.7E-02	5.6E-03	1.6E-02	1.5E-02	6.8E-03	3.0E-02	3.0E-02	4.5E-03	5.8E-03
Sb	9.0E-04	6.0E-04	6.0E-04	4.5E-04	4.0E-04	3.1E-03	2.2E-03	4.0E-04	1.2E-03	1.3E-03	3.5E-03	4.0E-04	6.0E-04	6.0E-04		
Sn	2.4E-02	5.8E-03	2.7E-02	4.8E-03	6.9E-03	2.1E-02	5.7E-04	1.3E-03	4.5E-03	6.6E-03	7.9E-03	1.0E-02	2.7E-02	2.7E-02	3.0E-03	3.2E-03
Zn	3.2E-02	6.8E-03	1.4E-02	1.6E-02	1.6E-02	1.4E-02	1.9E-02	2.5E-03	1.3E-02	1.7E-02	3.9E-03	1.3E-02	1.4E-02	1.4E-02		
Plastics general	4.4E-01	3.9E-01	4.6E-01	2.5E-01	2.3E-01	5.3E-01	3.9E-01	1.1E-01	1.6E-01	3.7E-01	2.7E-01	2.0E-01	4.6E-01	4.8E-01	2.8E-01	2.0E-01
Epoxy		1.7E-01	1.6E-01				4.6E-02		2.0E-01		3.9E-01		1.6E-01	1.5E-01		
Ceramics	1.4E-01			1.9E-01	6.9E-02		5.2E-02	4.4E-01	2.0E-01	6.4E-02	1.0E-01	1.8E-01			4.2E-01	3.3E-01
Glass LCD						1.0E-01										
Other average	4.4E-02	0.0E+0 0	0.0E+0 0	1.7E-01	9.9E-02		1.5E-01			2.3E-01		1.1E-01		3.0E-02		
Liquid Crystals						8.0E-03										
Br		3.2E-03	1.0E-04			3.8E-02	2.9E-03		1.2E-03	2.5E-03	1.2E-02		1.0E-04	1.2E-02		
Cl		3.9E-03	4.3E-03			5.0E-04				1.0E-02	2.3E-03		4.3E-03	2.7E-03		

Table 52: Average Printed Circuit Board compositions per treatment category (in fractions, total = 1) \* Limited number of data points

**Tabel D - 3:** Aandeel printplaten en gehalte zilver (Ag), goud (Au), palladium (Pd) en platinum in diverse elektrische apparaten (Bron: [31] tenzij anders vermeld voor de afzonderlijke waarden)

Product	Aandeel printplaat in product [%]	Metaalconcentratie in PWB (g/t PWB)				Gewicht apparaat [kg]
		Ag	Au	Pd	Pt	
Computer keyboard	2 - 2.1 [50]	700	70	30		
LCD monitor	4 - 4.4 [50]- 7.8 [12]	1300	490	99		
Computer muis	8 [31]- 8.2 [50]	700	70	30		
DVD speler	10 - 16.2 [18]	700	100	21		2.95 [51] - 3.4 [18]
Hi-fi unit	8 - 10.6 [18]	674	31	10		4.15 [51], 4.3 [18] 5.05 [18]
Laptop	15 - 17.1 [50]	1000	250	110		
Luidspreker	2	674	31	10		
Mobiele telefoon	22 - 22.1 [50]	3573 – 5540	368 - 980	285 - 287	7	
PC	8.9 [50] - 13	600 - 700 - 775 - 905 - 1000 [12]	81 - 156 - 230 [12] - 250 - 300 - 600	90 [12]- 99 - 100 - 110	40	
Printer/fax	6.6 [50] -8	350	47	9		
Radioset	20 - 20.5 [50]	520	68	8		5.13 [18], 5.5 [18], 6.2 [18]
Telefoon	21.9 [50] - 22	2244	50	241		
Videorecorder	10 [31]- 14 [18]	674	31	10		4.0 [18], 4.71 [51], 5.13 [18], 6.4 [18]
Audi en video		674	31			
Computer CRT Monitor		150 [12]	9 [12]	3 [12]		
Small IT and communication equipment		5700 [12]	1300 [12]	470 [12]		
TV set - CRT Monitor		280 - 1600 [12]	17 - 110 [12]	10 - 41 [12]		
TV set - LCD Monitor		250 [12]	60 [12]	19 [12]		
Koffiezetapparaat	0.3 [50]					
Boormachine	0.2 [50]					
Scheerapparaat	2.2 [50]					
Haardroger	0.1 [50]					
Handheld videospel console	21.5 [50]					
Mixer / blender	0.7 [50]					
Plastic elektrisch speelgoed	2.1 [50]					
Zakrekenmachine	14.1 [50]					
Broodrooster	2.8 [50]					
Stofzuiger	0.7 [50]					
Spelcomputer	19.6 [50]					

## Appendix E

Tabel E - 1 : Samenstelling CRT TV op basis van diverse literatuurbronnen

Materiaal [%]	[44]	[52]	[46]	[33]	[18]	[51]
IJzer/staal	17.8	12.0	15.1		4.5	
Koper	1.8	8.0			1.2	
Aluminium	7.0	2.0			0.2	
RVS					0.1	
Overig metaal					0.1	
Glas	58.0	51.0			65.3	
Plastic	8.2	10.5	16.7		17.0	
Printed Wire Board	5.0	3.0	9.7	6.2	6.1	
Fluorescerent poeder					0.0131-0.0136	
Hout				3.8	2.0	
Rubber					0.1	
Overig	2.1	13.5	58.5		3.4	
Totaal	100.0	100.0	100		100.0	
	[kg]			[kg]	[kg]	[kg]
Gewicht				26.7	24.4 - 25.6	24.1



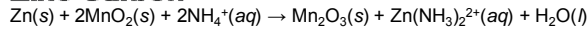
## Appendix F

Tabel F - 1: Samenstelling mobiele telefoon op basis van diverse literatuurbronnen

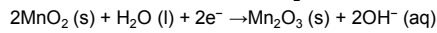
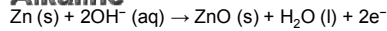
Samenstelling mobiele telefoon					
Referenties	[9]	[9]	[34]	[9]	[9]
Materialen	[%]	[%]	[gram]	[%]	[%]
Al	2.300	2.914			
Cu	26.800	14.235	9		
Fe	2.400	8.039			
Glass	5.500	10.594			
Plastic	44.000	59.600			
Ag	0.080	0.244	0.25	0.079	0.122
Au	0.080	0.038	0.024	0.008	0.022
Pd	0.061	0.015	0.009	0.006	0.006
Pt/La	0.000	0.004		0.000	0.000
Sb	0.000	0.084			
Be	0.000	0.003			
Overig	18.779	4.230			
Batterij			20 (3.8 gram Co)		

## Appendix G

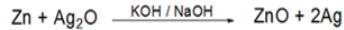
### Zinc-Carbon



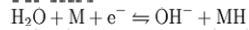
### Alkaline



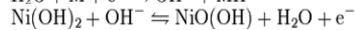
### Button



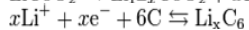
### Ni-MH



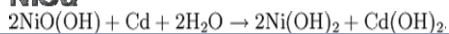
M=AB<sub>5</sub> A=Rare Earth/B=Co, Ni, Mn etc.



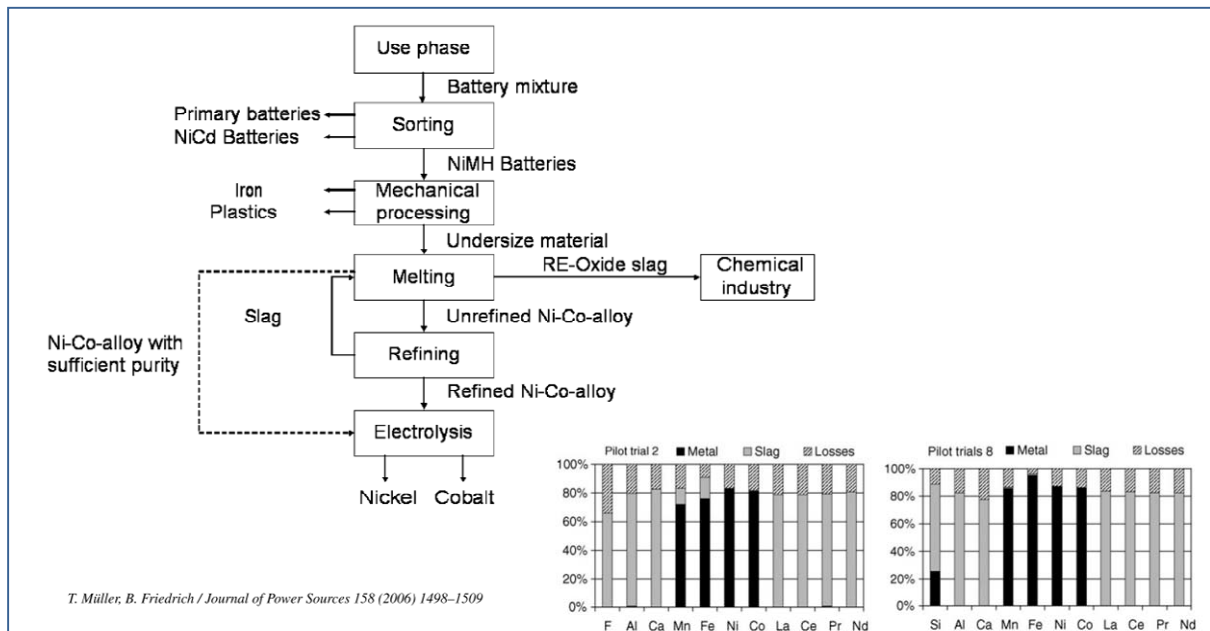
### Li Ion



### NiCd



Figuur G - 1: Batterij-chemie



Figuur G - 2: Verwerking van NiMH batterijen [38]

Chemical analysis of the electrodes (wt.%)										
Metals	Negative electrodes					Positive electrodes				
	Battery 1	Battery 2	Battery 3	Battery 4	Battery 5	Battery 1	Battery 2	Battery 3	Battery 4	Battery 5
Ce	24.14	ND	25.04	23.06	ND	ND	ND	0.80	ND	ND
La	16.02	48.67	21.38	20.33	ND	ND	ND	0.84	0.78	ND
Nd	10.57	ND	9.36	9.09	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Pr	1.63	4.35	1.14	0.96	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	ND	10.75	ND	10.60	34.80	31.28	29.31	32.96	32.56	29.07
Co	25.58	22.67	21.76	20.31	1.56	38.29	34.09	27.38	26.20	13.41
Mn	15.55	2.40	16.23	11.05	0.20	2.91	0.96	1.60	3.12	ND
K	4.58	6.90	2.32	2.14	ND	7.70	11.47	12.45	15.27	3.15
Fe	0.28	3.21	1.14	1.25	1.50	0.73	0.90	0.61	0.57	0.90
Zn	1.16	0.27	1.23	0.66	ND	18.40	21.45	22.30	19.60	0.18
Others	0.47	0.74	0.34	0.53	1.15	0.53	1.66	0.85	1.74	0.28
Cd	ND	ND	ND	ND	60.80	ND	ND	ND	ND	52.75
Total	99.98	99.96	99.94	99.98	100.01	99.84	99.84	99.79	99.84	99.74

ND, not detected.

**Ratio Ce:La:Nd:Pr ~0.44:0.35:0.18:0.02**

Figuur G - 3: Samenstelling van de elektrodes van NiMH batterijen en gemiddelde ratio van de verschillende REs (Ce,La,Nd,Pr) hierin [40]